



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Kompendium i Fundering

*Kapitel 7 - Grundvandsproblemer*

Jacobsen, Moust

*Publication date:*  
1990

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Jacobsen, M. (1990). *Kompendium i Fundering: Kapitel 7 - Grundvandsproblemer*. Aalborg Universitetscenter, Inst. for Vand, Jord og Miljøteknik, Laboratoriet for Fundering.

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

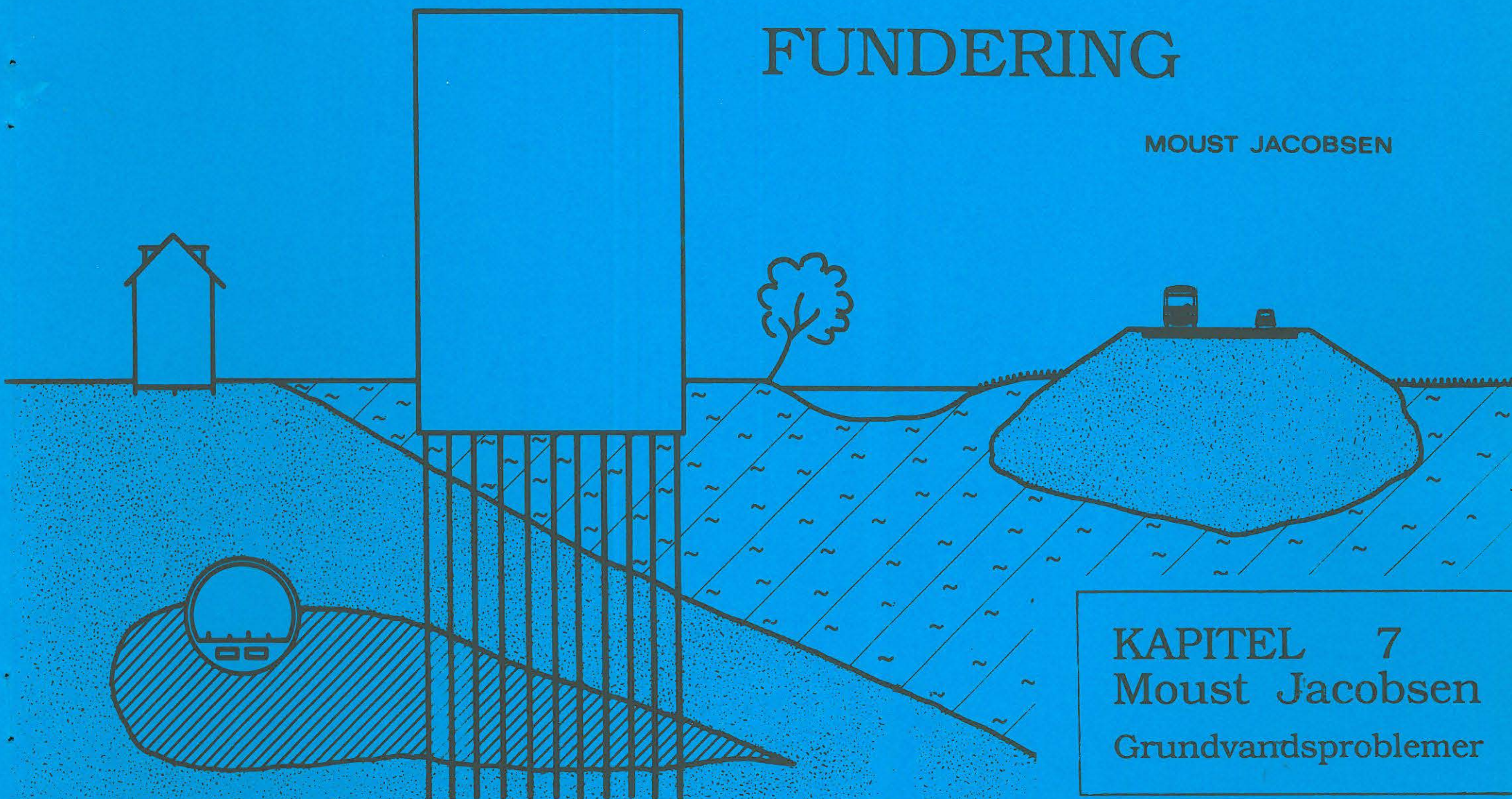


UDDRAG AF

KOMPENDIUM I

# FUNDERING

MOUST JACOBSEN



KAPITEL 7  
Moust Jacobsen  
Grundvandsproblemer



## 7. GRUNDVANDSPROBLEMER

### 7.0 INDLEDNING

Ved ethvert byggeri af en vis størrelse er det af stor betydning for funderingsarbejdet at kende de hydrologiske forhold på stedet. Man må således vide, hvor det primære grundvandsspejl står, om der findes sekundære vandspejl på stedet med mulighed for vanskeligheder i regnfulde perioder, og om der er dybere liggende lag med andre trykniveauer. Muligheden for opfrysning afhænger ligeledes af de hydrologiske forhold.

I mange egne af Danmark findes morænale aflejringer med en regelmæssig sammenblanding af jordarter med vidt forskellig permeabilitet, og her kan det være vanskeligt at angive en rationel løsning af grundvandsproblemerne, men man kan dog altid angive den mest rationelle fremgangsmåde. I andre egne veksler jordlagene på regelmæssig vis i lag af større eller mindre tykkelse og med varierende permeabilitet. På sådanne lokaliteter kan omhyggelige forundersøgelser føre til en rationel planlægning af byggeprocessen og angivelse af udformningen af midlertidige og permanente konstruktionsdele på grundlag af en beregning af grundvandets indflydelse.

Hvis en bygning skal funderes i eller over grundvandsspejlet, indskrænkes opgaven til at sørge for, at nedsynkende overfladevand kan bortledes ved drænforanstaltninger.

Skal der udføres en tørholdt udgravning i sand under grundvandsspejlet, er det nødvendigt at undgå, at det tilstrømmende vand forårsager erosion i sider eller bund, og man kan f.eks. udføre en midlertidig grundvandssenkning. I lerede jordarter kan tilstrømningen til byggegruben blive så lille, at den vanskeligt kan erkendes, og man kunne derfor forledes til at tro, at der ingen grundvandsproblemer er på det pågældende sted. Der kan dog ske en svækkelse af jordens styrke på grund af opadrettede gradienter, idet jorden da aflastes, og opsuger vand. Hele byggegrubens bund kan eventuelt løftes i vejret, idet der dannes en vandlomme i jorden under lerlaget. Selv i lerede jordarter må der derfor træffes passende foranstaltninger mod grundvandets påvirkning, selv om det ikke forekommer så umiddelbart indlysende som i sandjord.

I byggeperioden kan man være interesseret i at aflaste indfatningskonstruktioner for vandtrykket ved en midlertidig grundvandssenkning. Kan der tillades en permanent grundvandssenkning, kan visse permanente konstruktioner udføres langt billigere, men man må være opmærksom på faren for, at nærliggende bygninger tager skade. En tørdok ligger normalt så tæt på vandet, at virkningen på andre bygværker af grundvandssenkningen er ringe. Da vægten af en tørdok kan nedsættes meget betydeligt, hvis opdriften fjernes, bliver de fleste moderne dokker udført som dræned dokker med et permanent virkende grundvandssænkingsanlæg.

Kan en permanent grundvandssenkning ikke tillades, må de dele af en bygning, der er beliggende under grundvandsspejlet isoleres fra grundvandet med vandtæt beton, vandtætte membraner eller indskudsdræn. Samtidig må delene (kældergulve og kældervægge) dimensioneres for vandtryk, og hele bygningen må til enhver tid have en vægt, der er større end vandtrykket, eller hvis dette ikke er muligt, må bygningen forankres.

Kan en midlertidig grundvandssenkning ikke tillades, og skal bygningen funderes under grundvandsspejlet, må man enten afskære grundvandsstrømningen, f.eks. med en spunsvæg, eller der må udgraves vådt.

I vore byer foregår i disse år en senkning af grundvandet, fordi regnvandet af flisebelægninger og asfalteringer forhindres i at supplere grundvandet, samtidig med at kloakledninger nedlagt i sand danner et udstrakt drænsystem. Mange ældre bygninger, der er funderet på træpæle, kommer derved i fare, når pælehovederne rårner over grundvandsspejlet. Man har da valget imellem at rive husene ned eller søge at udbedre skaderne. En speciel fremgangsmåde består i at foretage en lokal grundvandshævning.

Ved småbyggeri er man naturligvis nødt til at anvende erfaringsmæssigt gode løsninger og søge at imødegå ubehagelige overraskelser på bedste måde. Dette afsnit er ikke skrevet med henblik på sådanne tilfælde.

TIL NOTAT



## 7.1 FORUNDERSØGELSER

Ved forundersøgelser for et bygværk, hvor der må forudses problemer med vandtryk og vandtilstrømning, må markundersøgelserne planlægges i overensstemmelse hermed.

### INDLEDENDE UNDERSØGELSER

Før en egentlig undersøgelse kan man søge oplysning om vandindvindinger i nærheden, og om det allerede har sænket grundvandspejlet. Med geologisk viden kan man danne sig et billede af kvaliteten af jordbundsforholdene og omfanget af problemet. (Kan man forvente rodede istidsaflejringer eller "rolige" lagserier?). Ved besøg på lokaliteten kan man se, hvorfra en eventuel vandtilstrømning vil komme, og om der kan forventes artesiske tryk i vandførende lag (i bunden af en dal eller ved foden af en skrænt). Med godt kortmateriale og erfaringer kan de indledende undersøgelser hurtigt foretages.

### LAGFØLGEBORINGER

Det er væsentligt at have lagfølgeboringer i fornødent omfang. Under borearbejdet må man være opmærksom på selv ganske tynde lag af ler, sand og grus, idet de kan vise sig at være af afgørende betydning for projektet. (Se også spalte 3). Boringerne må altså udføres særdeles omhyggeligt.

Selv om man træffer ler i og under funderingsniveau og derfor ikke kan forvente vandtilstrømninger fra underliggende lag, bør boringerne alligevel i mange tilfælde føres til større dybder for at undersøge, om der er fare for løftning. Hvis man ikke kan forvente artesiske tryk i jordlagene, føres undersøgelserne ned til dobbelt så stor dybde som byggegrubens bund.

Før borearbejdet standses, er det væsentligt at foretage en geologisk undersøgelse af boreprøverne for ad denne vej at bedømme, hvorvidt aflejringerne kan forventes at være ensartet opbygget, eller om der er mulighed for inhomogeniteter med ubehagelig indflydelse på grundvandssænkningen (vandførende sandårer). Man kan eventuelt på dette grundlag udvide antallet af lagfølgeboringer.

### GRUNDVANDSPEJLING

Foruden kendskab til jordbundsforholdene er det afgørende for projektet at have kendskab til trykniveauet i de forskellige jordlag. Ved observation kan man finde lagenes forskellige trykniveauer, der ofte vil variere med tiden. Det mindst varierende trykniveau repræsenterer det største vandreservoir og dermed det primære vandspejl. I kystnære egne vil det dog variere stabilt svarende til flod og ebbe. I nogle tilfælde vil flere trykniveauer være stabile, og man taler da om områdets øvre og nedre vandspejl. De sæsonmæssigt svingende trykniveauer repræsenterer mindre vandreservoirer og kaldes for sekundære vandspejl.

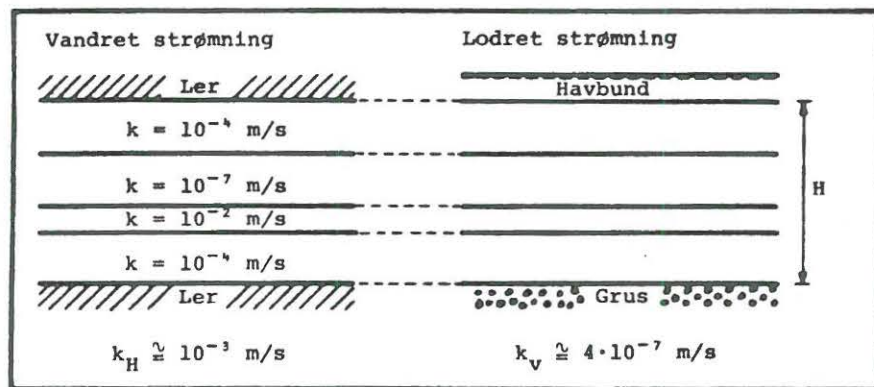
I områder med overskuelige og enkle lagfølger kan man træffe en hydrostatisk trykfordeling med et veldefineret grundvandsspejl. I mange andre tilfælde søger regnvandet ned i skåle, dannet af de impermeable jordlag, hvorved sekundære vandspejl opstår.

Når borearbejdet er afsluttet, kan trykniveauet observeres ved at nedsætte pejlerør i nogle af borehullerne. Ved at tilproppe borehullet ud for de vandstandsede lag, kan man måle vandtrykket i et af de vandførende lag pr. pejlerør. Flere pejlerør kan føres til forskellig dybde, eventuelt i samme boring. Som pejlerør kan anvendes 1"-PVC-rør, hvis nederste halve meter er forsynet med slidser. Pejlerøret må da anbringes i et passende grusfilter for at forhindre tilstopning.

Det er naturligvis væsentligt at fastslå, om et vandspejl er sekundært. Man kan observere vandstandsvariationerne gennem længere tid, eller man kan pumpe en vandmængde bort og undersøge om trykniveauet når samme stabile niveau bagefter. Sænkes niveauet her ved i et øvre lag, kan man beregne reservoirets størrelse.

Det er fristende at observere grundvandsspejlets beliggenhed i en udgravning, men kun i udstrakte sandaflejringer vil et vandspejl her repræsentere grundvandsspejlet. I lerjord vil tilstrømningen blive så ringe, at vandet eventuelt kan nå at fordampe, og regnet, vil hullet kunne holde på tilstrømmende vand meget længe.

## SEDIMENTERS PERMEABILITET



De vandførende jordlag består ofte af sedimenter, der er inddelt i en række smalle sand-, grus- eller siltlag, aflejret under vekslende strømningsforhold.

Grundvandsstrømningen foregår som regel i vandret retning, hvorved de mest permeable lag præger strømningsbilledet.

Idet potentialfaldet er ens i alle lag, fås

$$Q/i = k_H \cdot H = k_1 \cdot H_1 + k_2 \cdot H_2 + \dots + k_n \cdot H_n \quad (7.1)$$

$k_H$  er gennemsnitspermeabiliteten i vandret retning.

Foregår strømningen vinkelret på laggrænserne, er det samlede potentialfald  $h$  summen af de enkelte lags potentialfald. Idet

$$v = k \cdot i = k \frac{\Delta h}{H}$$

fås

$$\Delta h = \frac{v \cdot H}{k_v} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{v \cdot H_i}{k_i}$$

hvor  $k_v$  er den lodrette gennemsnitspermeabilitet. Idet  $v$  af kontinuitetsgrunde er konstant, fås

$$k_v = H / \sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i}{k_i} \quad (7.2)$$

Af eksemplet ses, at  $k_v$  er mindre end  $k_H$ . Det kan vises at gælde generelt.

Af eksemplet ses endvidere, at en bestemmelse af en prøves kornkurve vil give en værdi af permeabiliteten, der undervurderer en eventuel vandret strømning og overvurderer en lodret strømning.

Fremkalder grundvandssænkning en strømning, der bedst løses ved strømnets, må laget transformeres om til et isotropt lag. Er lagdelingen tilpas fin, kan tilnærmelsen blive god. Tykkelsen  $t_t$  og permeabiliteten  $k_t$  af det transformerede areal bliver:

$$t_t = t \cdot \sqrt{\frac{k_H}{k_v}} \quad \text{og} \quad k_t = \sqrt{k_H \cdot k_v}$$

Formlerne gælder strengt taget kun for et homogent, anisotropt jordlag med forskellig permeabilitet i lodret og vandret retning. Er alle de tynde jordlag anisotrope, må lagenes lodrette permeabiliteter indsættes i (7.2) og de vandrette i (7.1) før transformation.

## EKSEMPLER PÅ JORDARTERS PERMEABILITET

I det følgende gives nogle eksempler på permeabilitetskoefficienter  $k$  for forskellige jordarter:

Grus	$k: > 10^{-2}$	m/s
Velsorteret sand	$k: 10^{-2} - 10^{-5}$	m/s
Velsorteret silt	$k: 10^{-5} - 10^{-8}$	m/s
Moræneler	$k: 10^{-9} - 10^{-10}$	m/s
Dyndet sand	$k: 10^{-6} - 10^{-10}$	m/s
Fed ler	$k: 10^{-11} - 10^{-13}$	m/s
Dyndet ler	$k: 10^{-8} - 10^{-11}$	m/s

For rent sand er opstillet en empirisk formel for permeabiliteten (7.9). Når jorden er dyndet eller leret, gælder formelen ikke, fordi en stor del af porevandet er hygroskopisk bundet, eller fordi kornene er plade- eller nåleformede.



## FORUNDERSØGELSER 2

## PRØVEPUMPNINGER

Ved en prøvepumpning forstår man en afprøvning af en filterbrønd eller en række sugespidses for at undersøge om den valgte fremgangsmåde er egnet, og samtidig får man større viden om stedets hydrologiske forhold og dermed et langt pålideligere dimensioneringsgrundlag end laboratorieundersøgelserne kan give. Som grundlag for et større grundvandssænkingsprojekt vil man derfor som regel udføre en række prøvepumpninger.

Når grundvandet strømmer vandret gennem jorden hen mod en brønd eller grøft, følger det naturligvis de mest permeable lag. Ligger laget ved jordoverfladen og er nedadtil begrænset kaldes strømmingen for åben. Ligger laget nede i jorden mellem to vandstandsede lag, siges strømmingen at være lukket. I disse tilfælde kan strømmingen behandles teoretisk, således som det f.eks. er gjort i "Lærebog i Geoteknik" kap. 5. På de følgende sider er på dette grundlag beskrevet den nødvendige teori for tolkningen af prøvepumpninger.

Ofte vil man finde at teorien ikke stemmer helt. Det kan skyldes samtidig strømming i flere lag, men det kan også skyldes, at det vandførende lag ikke er helt gennemboret eller at der er sluppet luft ind i et lukket lag, hvorved strømmingen bliver delvis åben. Det teoretiske grundlag for disse specialtilfælde er gengivet i kort form til orientering.

Prøvepumpningen udføres på en brønd af samme type som de projekterede brønde, hvorved man får kontrol på beregningsforudsætningerne. Et antal pejlebrønde (3-4) nedsættes med voksende afstand fra pumpebrønden, og heri observeres grundvandsspejlet i det betragtede jordlag flere gange i døgnet under pumpningen, der vedvarer, indtil stabile tilstande er konstateret. I selve brønden placeres også en pejlebrønd, der føres ned i bunden af boringen, medens pumpen eller pumperøret hæves noget for at undgå, at strømmingen til pumpen indvirker på pejlningen. Pumpen drøvles, således at den afgiver konstant vandmængde pr. tidsenhed. Prøvepumpning kan også foretages på en række sugespidses, hvis man ønsker at udføre et

sugespidsanlæg (se side 7.20). Måleresultaterne kan ved bearbejdning give følgende resultater:

1. Om strømmingen er åben eller lukket.
2. Om laget kun er delvis gennemboret, eller der er trængt luft ind i et lukket lag.
3. Ved åben strømming kan permeabiliteten  $k$  bestemmes. Ved lukket strømming i lag med tykkelsen  $t$  (eventuel ukendt) kan produktet  $k \cdot t$  bestemmes.
4. Rækkevidden  $R$  af sænkningen.
5. Filtertabet i den undersøgte brønd.

I mange tilfælde er jordbundsforholdene ret vekslende, og man kan ikke på grundlag af borerer afgøre om strømmingen er åben eller lukket. Man kan afbilde forsøgsresultaterne for en enkelt brønd i en  $h - \log r$  afbildning (formel 7.4) eller en  $h^2 - \log r$  afbildning (formel 7.8). Viser måleresultaterne en retlinet variation i den første eller anden afbildning, har man altså henholdsvis en lukket eller en åben strømming. (Se eksempler). Ved bearbejdning af forsøgsresultater fra en række sugespidses benyttes på tilsvarende måde formelen for en grøft (7.5 eller 7.7).

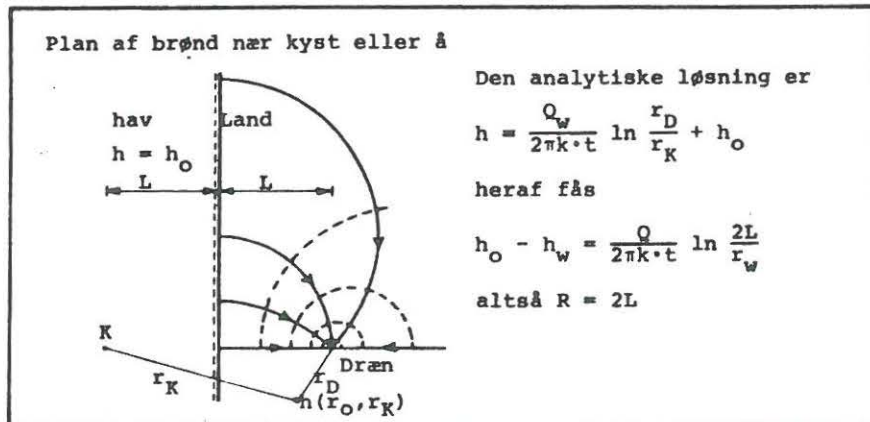
## BRØND OG GRØFT I LUKKET STRØMNING

Der betragtes en lodret brønd i et homogent, vandret jordlag med tykkelsen  $t$  og permeabiliteten  $k$  omgivet af to impermeable jordlag. Er tilstanden stationær, d.v.s. er den bortpumpede vandmængde  $Q_w$  og trykniveauet  $h$  i en given afstand fra brønden konstant, fås:

$$h = \frac{Q_w}{2\pi kt} \ln r + \text{konstant} \quad (7.3)$$

Konstanten kan bestemmes ved indsættelse af et samhørende talsæt ( $h_1, r_1$ ), for eksempel svarende til brøndens diameter ( $h_w, r_w$ )

$$h - h_w = \frac{Q_w}{2\pi kt} \ln \frac{r}{r_w} \quad (7.4)$$



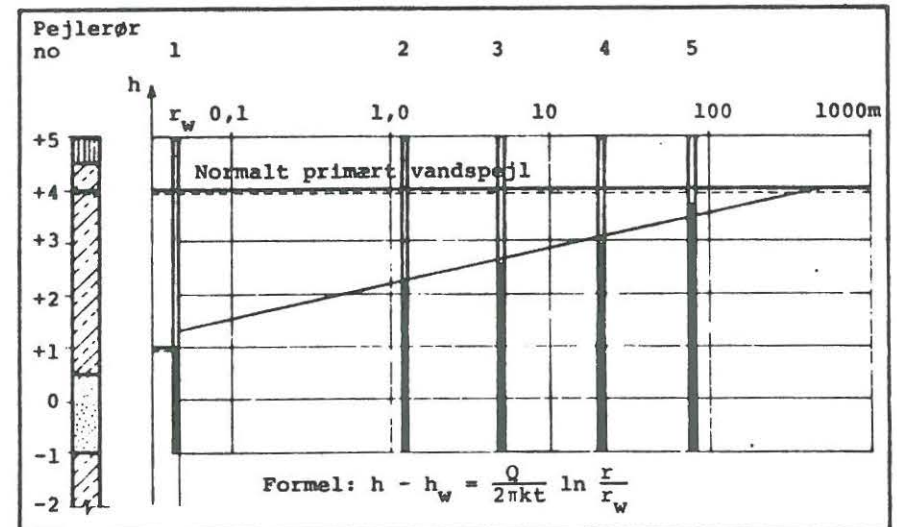
Det ses, at en forudsætning om uendelig udstrækning af laget er absurd ( $r \rightarrow \infty \Rightarrow h \rightarrow \infty$ ). Laget har altid en endelig udstrækning, begrænset af vandreservoarer i nærheden, og  $r$  har derfor en øvre grænse  $R$ , der kaldes for brøndens rækkevidde. Den tilsvarende værdi af  $h$  er vandreservoarets trykniveau  $h_0$ .  $R$  kan kun sjældent beregnes og vil da altid være større end afstanden til reservoiret, se figuren, hvor superpositionsprincippet er anvendt til at vise at rækkevidden er dobbelt så stor som afstanden til kysten. Da  $\ln R$  indgår i formelen, har et fejlskøn af  $R$  mindre betydning.  $R$  vil normalt være af størrelsesordenen 300-1000 m. Ved at indsætte ( $h_0, R$ ) i formel (7.4), fås vandføringen  $Q_w$ .

Placeres en grøft af stor udstrækning i laget fås en parallelstrømning med konstant vandhastighed (af kontinuitetsgrunde) og dermed konstant potentialfald. Heraf fås vandtilstrømningen pr. længdeenhed  $q$  til grøftens ene side:

$$q = t \cdot v = -t \cdot k \frac{\delta h}{\delta l} = t \cdot k \frac{h_0 - h_p}{L} \quad (7.5)$$

hvor  $L$  er grøftens rækkevidde, der igen må skønnes eller beregnes.

#### EKSEMPEL



Prøvepumpningen foregår på et areal med de viste jordbundsforhold. Strømningen, der skal undersøges, er lukket, og det vandførende sandlags tykkelse er i umiddelbar nærhed af brønden 1,5 m. Der er nedsat et pejlerør i boringen og yderligere 4 pejlerør i følgende afstande fra boringen: 1,25 m, 5 m, 20 m og 80 m. Da formelen for lukket strømning er lineær i  $h$  og  $\log r$ , benyttes den viste afbildning.

Der er indlagt den bedste rette linie, hvis dekadehældning er  $\frac{Q}{2\pi k t} \ln 10$ , da 10-tals logaritmen er anvendt. Den oppumpede vandmængde  $Q$  er målt til 1,0 liter pr. sec. Heraf fås

$$k \cdot t = \frac{10^{-3} \cdot \ln 10}{2\pi \cdot 0,7} \text{ m}^2/\text{sec} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Af figuren ses umiddelbart, at  $R = 500$  m og  $h_w = 1,3$  m, regnet ud fra kote 0. Da vandstanden i brønden måles til kote 1,0 m, fås filtertabet herved til 0,3 m.



## FORUNDERSØGELSER 3

## BRØND OG GRØFT I ÅBEN STRØMNING

Der betragtes et homogent, vandret jordlag med permeabiliteten  $k$ , der er begrænset af jordoverfladen og et underliggende impermeabelt lag. En vandstrømning i et sådant lag kaldes for en åben strømning, idet dens øvre begrænsning er et grundvandsspejl, hvis niveau afhænger af strømmingen. Betragtes en parallelstrømning (se fig.), fås det fra teorien velkendte strømnet. Frank Engelund antager, at potentialfladerne er parallelle, og idet  $h$  sættes til 0 i det åbne lags underside, får det gennemstrømmede areal højden  $h$ . Man kan herved udlede, at Laplace ligningen bliver:

$$\nabla^2(h^2) = 0 \quad (7.6)$$

altså lineær i  $h^2$ . Superpositionsprincippet gælder derfor også for en åben strømning blot for  $h^2$ .

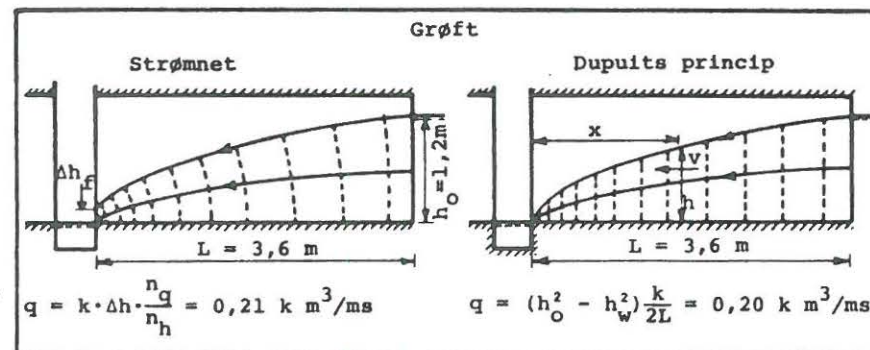
Dupuits princip, der er en ekstra tilnærmelse, erstatter potentialfladerne med lodrette flader.

Dupuits princip kan illustreres ved at betragte tilløbet til en grøft, der er en plan strømning og derfor kan kontrolleres ved strømnet (se figuren). Forholdene er her valgt således, at grøftens vandspejl står i lagets underside ( $h_w = 0$ ), idet vandet løber ned ad grøftens sider. Det trykfald  $\Delta h_f$ , der fremkommer her, er meget afhængig af omstændighederne. Er  $h_w > 0,1 h_0$  og  $L > 4 \cdot h_0$ , vil  $\Delta h_f$  dog være nær nul for en grøft.

Foregår tilstrømningen fra siderne i laget, giver Dupuits princip:

$$q = h \cdot v = -k \cdot h \frac{\delta h}{\delta x} \Rightarrow h^2 - h_p^2 = \frac{2q}{k} \cdot x \quad (7.7)$$

Af figuren ses, at selv i det tilfælde, hvor den ene grænse er forkert, opnås ved Dupuits princip gode resultater.



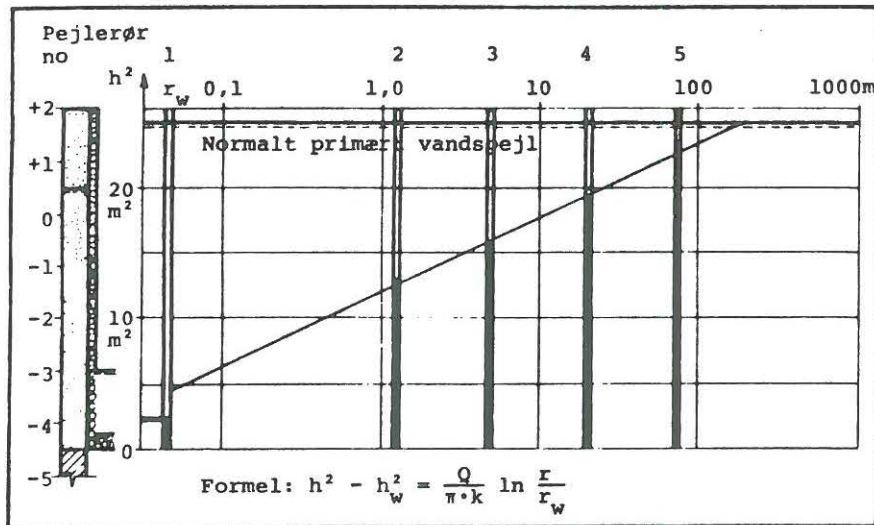
Placeres en lodret brønd i et udstrakt lag og betragtes de stationære forhold omkring brønden fås af Dupuits princip, analogt med (7.4):

$$h^2 - h_w^2 = \frac{Q_w}{\pi k} \ln \frac{r}{r_w} \quad (7.8)$$

Der gælder helt analoge betragtninger om brøndens rækkevidde  $R$ .

Man vil ved måling altid konstatere et trykfald  $\Delta h_f$ , der afhænger af brøndens diameter i forhold til dybden.

## EKSEMPEL



Prøvepumpningen foregår i en ensartet forekomst af sand til kote -4,5, hvorunder der findes ler. Boringen er ført helt gennem laget, og man kan derfor sammenligne resultatet med det simple teoretiske tilfælde (formel 7.8) ved at afbilde  $h^2$  mod  $\log r$ .

Vandspejlet i brønden observeres i kote -3, svarende til  $h = 1,5$  m. Der bortpumpes 15 liter pr. min. Heraf findes som før:

$$R = 180 \text{ m; } h_w = 2,2 \text{ m og } k = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec.}$$

Filtretabet måles til 0,7 m og er altså noget større end målt i lukket strømning. Filtretabet inkluderer da også et ekstra led hidrørende fra, at antagelsen om lodrette potentialflader ikke er opfyldt nær brønden.

Både i åbne og lukkede lag vil man kunne få observationer, der ikke kan give retlinede forløb, som i de to simple tilfælde. Man kan eventuelt anvende formler for delvis gennemborede lag eller delvis lukkede strømninger. (Se de næste sider).

LABORATORIEBESTEMMELSE AF  $k$ 

I laboratoriet er det vigtigt at fastslå, hvor stor en permeabilitet man kan forvente i de vandførende lag. I mange tilfælde er der ikke fornøden kapital til prøvepumpninger, og man må da finde permeabiliteten i laboratoriet. Det må understreges, at prøvepumpninger giver et langt pålideligere resultat end laboratorieforsøg.

En sedimenteret sandaflejring kan indeholde afvekslende, tynde lag af sand og grus i forskellige fraktioner. Aflejringen får langt større vandret end lodret permeabilitet (se side 7.4). Ved prøveoptagning fås en blandingsjordart med en mellemværdi af permeabiliteten. I en ren sand, der virker homogen, forandres poretalet måske under prøveoptagning; virkningen er dog ringe. Nær jordoverfladen kan trærdødder og andre inhomogeniteter ændre jordlagets vandføringsevne.

I laboratoriet vil man derfor relativt sjældent udføre gennemstrømningsforsøg, men normalt nøjes med at udføre sigtninger og slemninger og optegne kornkurver for et repræsentativt udvalg af de optagne prøver. Herefter vil man på grundlag af erfaringstal udregne permeabilitetskoefficienten og må til gengæld regne med en relativ stor usikkerhed.

Med sandprøver har Mansur udført en række laboratorieforsøg på enskornet sand til bestemmelse af  $k$  og kontrolleret dem ved hjælp af markforsøg. Resultatet af laboratorieforsøgene kan udtrykkes i følgende formel:

$$k = \frac{100}{1 \text{ sec} \cdot \text{cm}} d_{10}^2 = C d_{10}^2 \quad (7.9)$$

hvor  $d_{10}$  er korndiameteren svarende til 10% gennemfald gennem sigten. Andre bestemmelser af  $C$  giver dog en variation mellem 100 og 150  $\text{cm}^{-1} \text{sec}^{-1}$ . Værdien af  $C$  er en middelværdi og behæftet med nogen spredning. For markforsøg bliver  $C$  ca. 50% større. Formlen er tvivlsom for silt, og for grus kan vandhastigheden blive så stor, at strømmingen bliver turbulent.



## SPECIALTILFÆLDE

## DELVIS GENNEMBOREDE JORDLAG I LUKKET STRØMNING

I de tidligere overvejelser har vi som forudsætning haft, at der enten forekom åbne eller lukkede strømninger, og at brøndene gik helt igennem de vandførende lag. Det er dog muligt at behandle enkelte andre tilfælde på simpel måde.

En smal grøft, der delvis gennemskærer et lukket lag, fremkalder en plan lukket strømning, der kan illustreres ved strømnet som vist på øverste figur for enkeltsideig tilløb. Strømningen koncentrerer sig om grøften, hvorved antallet af potentialspring vokser. I afstanden  $t$  fra grøften er strømningen næsten en parallelstrømning. Havde grøften gennemskåret laget, ville der have været 5 potentialspring på strækningen  $t$ , nu er der 6, og rækkevidden  $L$  må derfor forøges med  $\frac{\Delta L}{t} = \frac{1}{5} = 0,2$ , hvis formlen for parallelstrømning skal bruges:

$$q_p = \frac{k \cdot t (h_o - h_w)}{L + \Delta L}$$

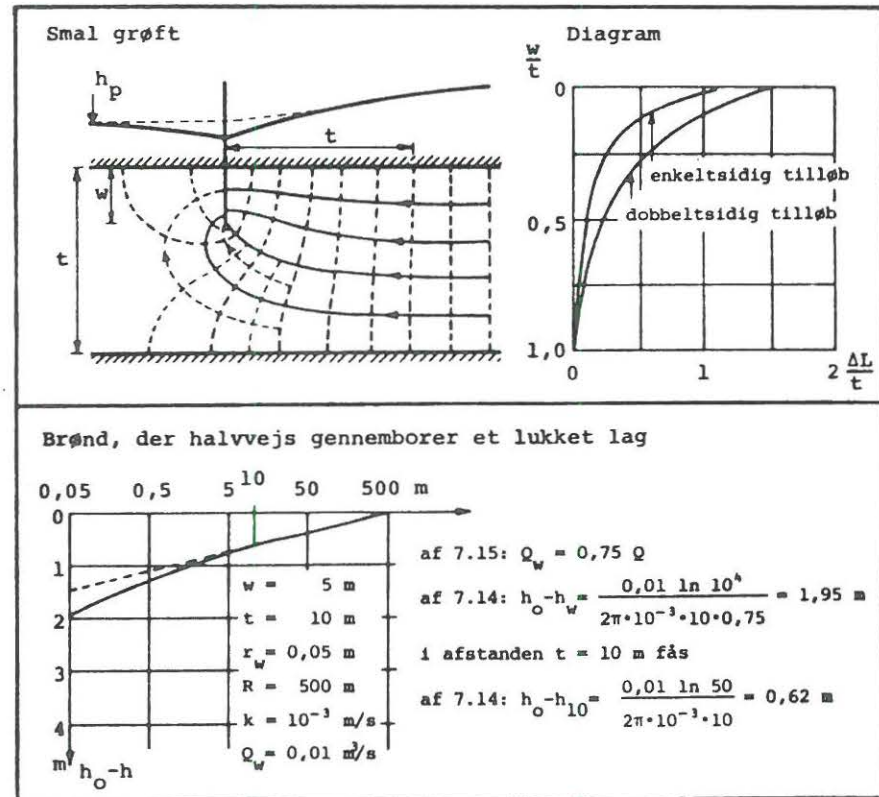
Andre samhørende værdier af  $\frac{W}{t}$  og  $\frac{\Delta L}{t}$  ses på diagrammet. Har grøften en betragtelig bredde, ændres strømningsforholdene; diagrammet kan ikke benyttes, og man er da nødt til at optegne et strømnet med den aktuelle grøftebredde.

Trykniveauet bag grøften vokser igen noget, nemlig svarende til det trykniveau  $h_p$ , der ville være i en gennemgående grøft med den reducerede vandmængde  $q_p$ .

To parallelle grøfter med en afstand større end  $t$  og med tilløb fra begge sider kan beregnes med samme formler. En grøft med tilløb fra begge sider giver derimod et andet strømnet. På figuren er derfor indlagt en kurve svarende til dette tilfælde.

En brønds vandføring  $Q_w$  vil også reduceres under sådanne omstændigheder. Uden reduktion fås  $Q_w$  af (7.4):

$$Q_w = \frac{2\pi k t (h_o - h_w)}{\ln \frac{R}{r_w}} \quad (7.10)$$

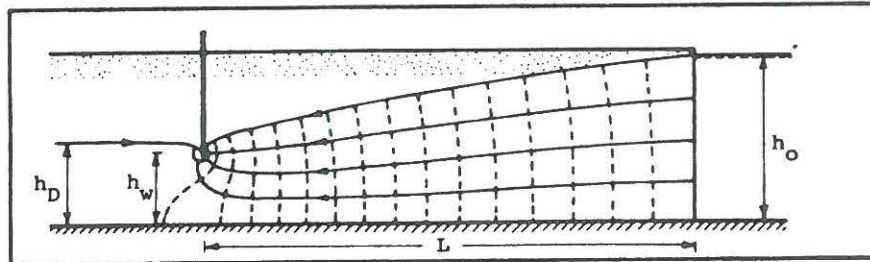


Med reduktion kan  $Q_{wr}$  beregnes tilnærmeth af

$$Q_{wr} = Q_w \frac{W}{t} \left( 1 + 7 \sqrt{\frac{r_w}{W}} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{W}{t}\right) \right) \quad (7.11)$$

Strømningen vil i en afstand af  $t$  fra brønden ikke kunne skelnes fra den strømning, der vil foregå til en brønd, der går gennem hele laget, og fører vandmængden  $Q_{wr}$ . Trykniveauet indtil afstanden  $t$  vil derfor aftage med  $\ln r$ , og en ekstra sænkningstragt vil dannes inde omkring brønden på grund af strømningskoncentrationen.

## DELVIS GENNEMBOREDE JORDLAG I ÅBEN STRØMNING



En smal grøft ( $b=0$ ), der delvis gennemskærer et åbent jordlag, fremkalder en plan, åben strømning i laget, og trykniveauet kan derfor i princippet beregnes ved strømmet, der dog bliver meget kompliceret på grund af grundvandsspejlet og den lodrette begrænsning mod grøften. Ved et frit vandspejl er betingelsen nemlig, at poretrykket  $u = 0$ . (Se figur).

Resultatet af modellforsøg af Chapman er følgende formler, der gælder for  $L/h_0 > 3$ :

$$q_p = (0,73 + 0,27 \frac{h_0 - h_w}{h_0}) \frac{k}{2L} (h_0^2 - h_w^2) \quad (7.12)$$

Formlen gælder for enkeltsidig tilløb. For dobbeltsidig tilløb kan som tilnærmelse regnes med den dobbelte vandmængde.

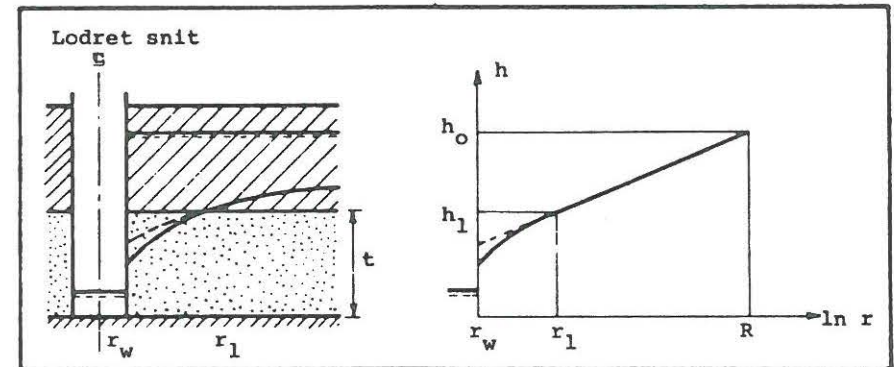
Med enkeltsidig tilløb bliver trykniveau nedstrøms  $h_D$  noget større end  $h_w$ , nemlig:

$$h_D = h_w \left( \frac{1,48}{L} (h_0 - h_w) + 1 \right) \quad (7.13)$$

Med dobbeltsidig tilløb til to parallelle og smalle grøfter ( $b = 0$ ), hvor afstanden mellem disse er større end  $2 \cdot h_w$ , kan den samme formel anvendes.

Trykforholdene omkring en brønd der kun delvis når gennem laget, beregnes tilnærmelsesvis som om den var gennemgående, af formel (7.8). Trykforholdene for  $r/h$  mindre end 1,5 er dog komplicerede at beregne, men har normalt heller ikke nogen interesse.

## DELVIS LUKKET STRØMNING



Der betragtes en strømning i et lukket lag, hvor trykniveauet i brønden sænkes så meget, at der slipper luft ind i det lukkede lag, hvorved den del af strømmingen, der er nærmest brønden, bliver en fri strømning. (Se figuren). Problemet kan løses ved kombination af løsningen for åben og lukket strømning.

Trykniveauet regnes som sædvanlig ud fra oversiden af det nedre impermeable lag, og tykkelsen af laget  $t = h_1$ . Det sted, hvor trykniveauet er lig med lagtykkelsen, ligger i afstanden  $r$  fra brøndmidte.

For  $r < r_1$  gælder derfor (7.8):

$$h^2 - h_w^2 = \frac{Q_w}{\pi k} \ln \frac{r}{r_w}$$

og for  $r > r_1$  gælder (7.4):

$$h - h_1 = \frac{Q_w}{2\pi k h_1} \ln \frac{r}{r_1}$$

Da  $Q_w$  af kontinuitetsgrunde er ens i de to formler, fås ved indsættelse af  $(h_1, r_1)$  i (7.8) og  $(H, R)$  i (7.4):

$$Q_w = \frac{\pi k}{\ln \frac{R}{r_w}} (2h_0 t - t^2 - h_w^2)$$

Den samme fremgangsmåde kan anvendes ved grøfter.



## 7.2 HJÆLPEMIDLER

### DRÆN

For at kunne løse grundvandsproblemerne er der i tidens løb udviklet en lang række hjælpemidler, hvoraf de væsentligste skal gennemgås i det følgende.

Senere i dette kapitel gennemgås en række nyere foranstaltninger, der har til hensigt at undgå en ændring i stedets hydrologiske forhold, hvis det er muligt. Således kan en bygning funderes under grundvandsspejlet, såfremt der på passende måde tages hensyn til det i konstruktionsfasen. Stærkt vandførende jordlag kan eventuelt tætnes på passende måde (f.ex. ved injektion med cementpasta, asfalt eller kemikalier). Såfremt grundvandstilstrømningen til byggegruben er for stor, kan man anvende undervandsbeton.

I den permanente tilstand må bygninger endvidere udstyres med foranstaltninger, der skal hindre regnvand og anden fugt i at trænge ind i bygningen.

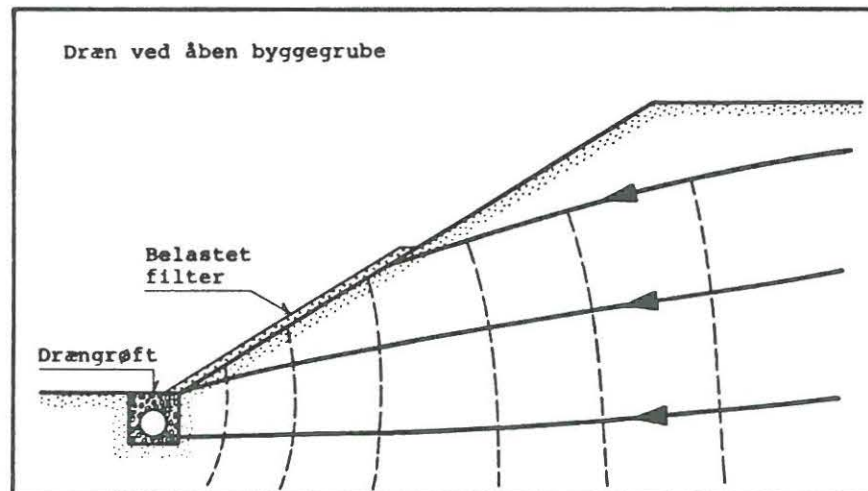
#### ÅBNE BRØNDE OG GRØFTER

En simpel måde at udføre en mindre grundvandssænkning på, består i at grave en eller flere åbne brønde eller grøfter og pumpe det tilløbne vand væk herfra. For at undgå erosion eller opskydning i bunden, må der etableres et filter, eventuelt bestående af flere lag med det fineste i bunden, med en sådan vægt at de effektive spændinger intetsteds bliver negative (løftningskriteriet). Et sådant filter kaldes et belastet filter.

De åbne brønde eller grøfter kan etableres uden for byggegruben og kræver da god plads, eller de kan i visse tilfælde etableres i bunden af byggegruben, hvis vægge da må dimensioneres for vandtryk, hvis de eventuelt kan være tætte.

#### FLADEDRÆN

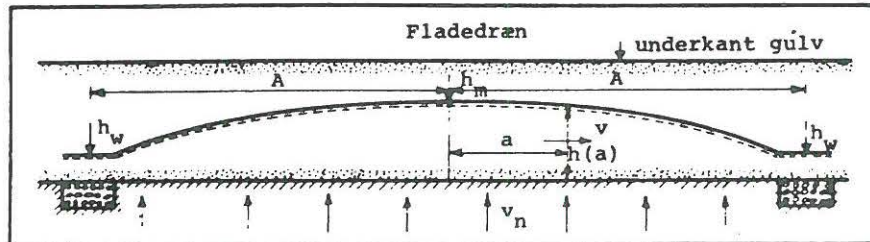
Ønsker man at sænke grundvandsspejlet permanent under et bygværk



for at nedsætte opdriften, udlægges et tæppedræn direkte herunder, og det sættes i forbindelse med et omfangsdræn, der følger husets ydre konturer. Man opnår i princippet at udlægge et lag, hvori der kan foretages en grundvandssænkning ved at etablere en eller flere pumpebrønde. Er tæppedrænet af nogen udstrækning, kan der herunder etableres et netdræn bestående af en række grøfter placeret i et netværk og fyldt med grovere materiale end tæppedrænet, således at grøfterne kan føre vandet hen til pumpebrønden med det fornødne lille tryktab.

Dimensioneringen af et tæppedræn og netdræn foretages normalt ikke, men folk med kendskab til de lokale jordarter har en række håndregler, der fortæller, hvor langt der skal være mellem dræn-grøfterne, og hvor tykt tæppedrænet skal være. En dimensionering kan dog foretages, således som det er vist på næste side.

## BEREGNING AF FLADEDRETN

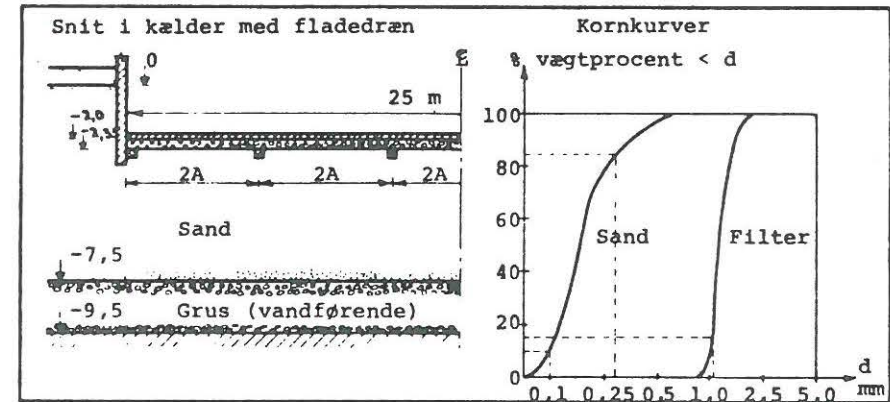


Tilstrømningen til et fladedræn foregår nedefra og afstrømningen forløber som en åben strømning, der kan beregnes efter Dupuits princip. På figuren ses et fladedræn med afløb til parallelle grøfter med indbyrdes afstand  $A$ . Vandtilstrømningen forudsættes at foregå med konstant hastighed  $v_n$ . Idet der betragtes vandafstrømningen  $q(a)$  gennem et snit i afstanden  $a$  fra symmetrilinien, der er en skillestrømlinie, fås:

$$q(a) = v_n \cdot a = h(a) \cdot v = -k \cdot h(a) \frac{\delta h(a)}{\delta a}$$

$$h^2 - h_w^2 = \frac{v_n}{k} (A^2 - a^2) \Rightarrow h_m^2 - h_w^2 = \frac{v_n}{k} \cdot A^2 \quad (7.14)$$

## EKSEMPEL



Der ønskes opført en bygning, hvis kældergulv ligger 2 m under normal grundvandsstand. Bygningens og aflejringens data fremgår af figuren.

Sandets permeabilitet anslås lidt på den sikre side til  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s (af 7.19). Den hastighed, hvormed vandet løber til fladedrænet nedefra, bliver da:

$$v_n = k \cdot i = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{2}{5} = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$$

Filterlagets tykkelse sættes til 35 cm og efter formel (7.14) fås da følgende krav til filterets permeabilitet  $k_f$ , idet  $h_m$  sættes til 20 cm og  $h_w$  til 5 cm:

$$k_f = \frac{0,8}{0,04 - 0,0025} \cdot 10^{-4} \cdot A^2 = 0,2 \cdot 10^{-2} \cdot A^2 \text{ m/s}$$

Vælges afstanden mellem grøfterne  $2A$  til 5 m fås

$$k_f \sim 10^{-2} \text{ m/s og } d_{10,f} = \sqrt{\frac{1}{150}} \text{ cm} \sim 1 \text{ mm}$$

Filterkriteriet (7.15) er netop opfyldt. Kapillariteten kan højst andrage 10 cm (LG 3.14), og filtret hindrer derfor også vand i at trænge op i kælderen. Drængrøfternes tryktab må dog være minimalt.



## HJÆLPEMIDLER 2

## FILTERBRØNDE

Ved større grundvandssænkingsanlæg vil man normalt anvende brønde, der kan etableres uden hensyn til det oprindelige grundvandspejl, og som ved valg af rigtig metode kan opfylde alle krav til grundvandssænkningen.

Den teknik, der bedst kan tilpasses varierende jordbundsforhold, består i at nedsætte borede filterbrønde. Filterbrøndene er dog relativt dyre og kræver særligt grej ved etableringen. Der er derfor også udviklet de såkaldte sugespids, hvis anvendelsesområde dog er noget begrænset.

En filterbrønd består af et filterrør omgivet af et filter, der består af en filterkastning og måske inderst en gruspakning. Den etableres i et borehul, der normalt er 15-50 cm i diameter, men kan være betydeligt større. Filtret dimensioneres på grundlag af det optagne materiale, således at det opfylder filterkriterierne.

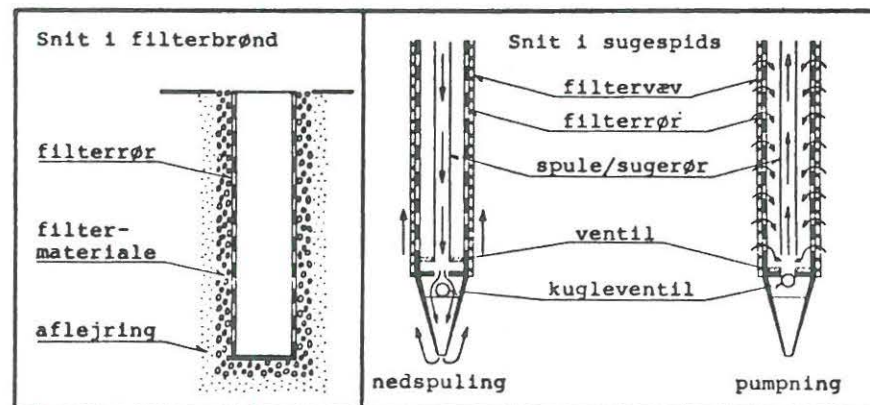
Kan filtret bestå af kun et lag, sænkes filterrøret ned på plads i boringen og en filterkastning anbringes mellem røret og den omgivende jord i hullets nederste 0,5 - 1 m, idet foringsrøret samtidig trækkes op på en sådan måde, at der til stadighed er filtermateriale i foringsrøret. Under denne proces skal vandet i foringsrøret stå højere end grundvandsspejlet, for at filtret kan udlejres med nedadrettede strømkræfter.

Skal filtret bestå af flere lag, holdes de inderste lag på plads af et ståltrådsnet omkring filterrøret (en gruspakning).

Den effektive radius  $r_w$  af en filterbrønd kan regnes til ydersiden af filterkastningen, selv om den kan være lidt større på grund af udvaskning af jorden nærmest filtret.

I visse tilfælde ønskes sænkningen kun foretaget i eet jordlag, og man kan tætnes omkring filterrøret med en slamprop (bentonit).

En speciel form for filterbrønde mangler filterrøret, idet det ikke er meningen, at der skal pumpes fra den. En sådan brønd kan be-



nyttes til at fjerne generende vandtryk under byggegruber for så vidt vandmængden er beskeden (aflastningsbrønd), eller den kan føre vand fra øvre lag ned til det lag, hvori den egentlige grundvandssænkning foregår.

## SUGESPIDSER

Sugespidsen er et rør med en ydre diameter på 6-8 cm, der er forsynet med slidser af passende størrelse. Røret er for enden forsynet med ventilarrangement, der sikrer, at en vandstrøm fra oven går ud gennem spidsen og skyller jorden bort. Under pumpning tvinges vandet gennem slidserne. På de moderne sugespidses anvendes skyllerøret også til sugningen.

Sugespidsen skyllendes således ned, eventuelt under samtidig anvendelse af andre metoder såsom nedpresning eller i groft grus vibering. Der anvendes sædvanligvis ikke noget grusfilter, men sugespidsen kan svøbes ind i filtervæv. Iøvrigt opbygges der automatisk et slags filter under nedskyllningen, fordi de groveste korn bliver tilbage og lejrer sig om spidsen, når pumpningen ophører.

## FILTRE

Mellem drænet, der bør være meget permeabelt, og den naturlige aflejringslag, indskydes normalt et eller flere lag filtre for at hindre kornene fra jorden i at skylles ind i drænet og tilstoppe det. Det er dog nok, at filtret kan tilbageholde de større korn, der da selv kan holde mindre korn tilbage, hvorved en lille, men begrænset jordmængde trænger ind i filtret i starten.

Indeholder grundvandet okker eller kalk, vil det udskilles i filtret i tidens løb og nedsætte dets effektivitet væsentligt, eventuelt tilstoppe det helt.

Ved anvendelsen af Terzaghi's filterkriterium sammenlignes kornkurver for filter og naturlig aflejringslag. Den naturlige aflejrings større korn repræsenteres af  $d_{85}$ , aflejrings. Filtrets evne til at afvise disse korn afhænger af dets mindre korn, der repræsenteres af  $d_{15}$ , filter.

Kravet til filtret kan herefter skrives:

$$d_{15, \text{ filter}} < F \cdot d_{85, \text{ aflejrings}} \quad (7.15)$$

hvor  $F$  vælges så stor som mulig af økonomiske grunde.  $F$  kan maksimalt være 5, der kun kan anvendes, hvis jordbundsforholdene er meget regelmæssige, da jordprøvernes kornkurver kun i dette tilfælde kan regnes repræsentative for hele aflejringslaget.  $F = 4$  er en normal værdi.

Man kan opstille endnu et krav, der skyldes ønsket om at undgå unødigt filtertab:

$$d_{15, \text{ filter}} > 4 \cdot d_{15, \text{ aflejrings}} \quad (7.16)$$

Oftentimes er det nødvendigt at opbygge et filter af flere lag, der dimensioneres ved successiv anvendelse af kriterierne (7.15) og (7.16), idet det sidst beregnede filterlag betragtes som "aflejringslag".

Som filtermaterialer kan anvendes naturlige aflejringslag, men grusgrave fremstiller filtersand og -grus ved sigtning. I tabellen er anført de gængse handelsvarer:

Lund nr	Sorteringsgrænser mm	Middelkorn mm
00	0,2-0,4	0,30
0	0,3-0,6	0,45
1	0,4-0,8	0,60
2	0,7-1,2	0,95
3	0,9-1,4	1,15
4	1,2-1,8	1,50
5	1,5-2,2	1,85

Drænet består som regel af et rør forsynet med slidser eller huller, hvorigennem vandet løber fra det inderste filterlag. Det inderste filters korn må da have en sådan størrelse, at de største korn ikke passerer slidserne.

Kravet til den optimale slidsebredde  $s$  kan skrives

$$s = \frac{2}{\pi} \cdot d_{10}$$

### FILTERVÆV

Filtervæv fremstillet af uorganisk materiale kan vikles om drænrøret, hvorved finere materiale forhindres i at skylle gennem slidserne. Filtervævet kan iøvrigt erstatte det inderste lag filtersand.

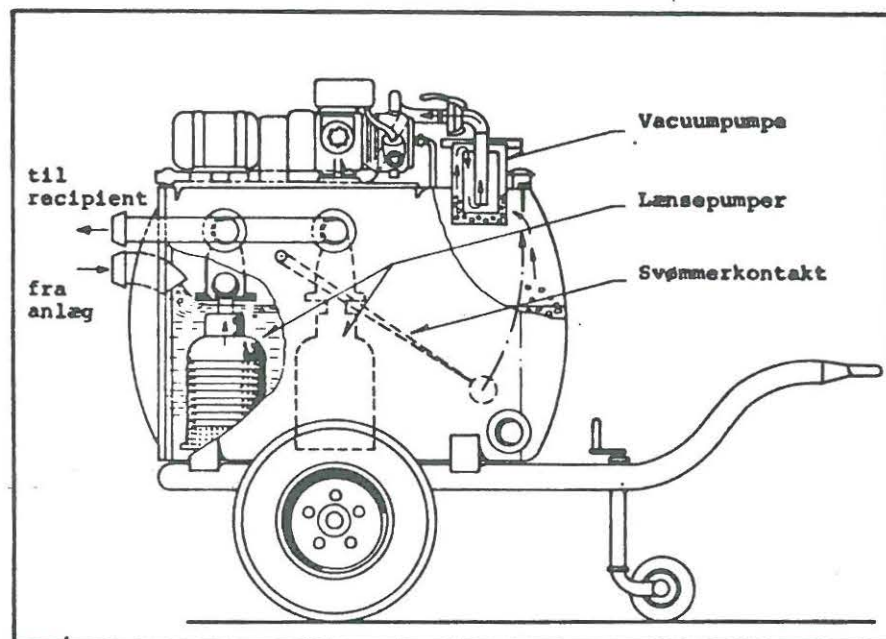
### FILTERTAB

I den grundlæggende teori er det forudsat, at vandet kan løbe uden tryktab fra det omgivende jord til drænet. Anbringelsen af filterrør og filtermateriale betyder naturligvis et tryktab, filtertabet. Det kan bestemmes ud fra prøvepumpninger, og andrager ved artesiske borer fra 0,3 m til 0,5 m. Ved åbne grundvandsstrømninger er der dog også et teoretisk tryktab  $h_f$ , hvorved filtertabet normalt andrager fra 0,5 - 2,5 m.



## HJÆLPEMIDLER 3

## VACUUMMETODEN



Vacuummetoden består i at skabe så stort undertryk som muligt i jorden nærmest filtret for at forøge vandhastigheden i finkornede jordarter og dermed accelerere virkningen af grundvandssænkningen. Metoden kan benyttes både ved filterbrønds- og sugespidsanlæg og forudsætter en tætning omkring det glatte rørs øvre halve meter. Tætningen kan udføres som en ler- eller bentonitslamprop. Tætningen bliver normalt ikke helt effektiv, og moderne anlæg er derfor forsynet med en speciel vacuumpumpe, der skal hindre indtrængende luft i at nå grundvandspumpen.

På figuren er vist et system, der er hyppigt anvendt i dag. Vandet og luften fra anlægget suges ind i en tank, hvorpå vacuumpumpen er

monteret. I bunden af tanken er anbragt en eller flere løsepumper, der sender vandet ud til en recipient. Tomgang af pumpe forhindres af en flydekontakt. På nogle modeller kan løsepumperne let udskiftes, hvorved ydelsen kan tilpasses vekslende behov.

Største sugehøjde er for et godt anlæg 9-10 m.

Et sådant anlæg kan for eksempel betjene 60 sugespids og pumpe  $300 \text{ m}^3$  vand i timen.

Der findes mange forskellige vacuumanlæg, der alle er en kombination af en vacuumpumpe og en centrifugalpumpe, eventuelt helt sammenbygget. Vacuumpumpen skal da fjerne luften, inden den når ind i centrifugalpumpen.

Sugespidsanlæg udføres hyppigt som vacuumanlæg, fordi de da bliver mindre sårbare over for utætheder.

## ELEKTROOSMOSE

En elektrisk strøm i en lerjordart fremkalder bevægelse i grundvandet. Den inderste del af et lermineral er negativt ladet, mens ydersiden består af positive ioner, hvortil er knyttet vandmolekyler, der virker som dipoler. Hvis et elektrisk felt påtrykkes ler-aflejringer, vil de positive ioner bevæge sig mod katoden (-) og føre en del af vandet med sig. Påføres jorden derfor et elektrisk spændingsfelt ved at give sugespids eller drænrør negativ polaritet og nedrammede jernrør positiv polaritet, vil vandet blive ført mod drænene. Den nødvendige effekt anslås at ligge mellem 3 og  $30 \text{ kWh/m}^3$ . Metoden har ikke været benyttet her i landet.

## PUMPER

I det følgende skal nævnes nogle af de mest anvendte pumpetyper samt eksempler på deres størrelse og ydeevne. Ønskes et nærmere kendskab til pumpekonstruktion og virkemåde må dette søges i speciallitteraturen. Ved praktiske opgaver henvises til pumpefabrikanternes kataloger.

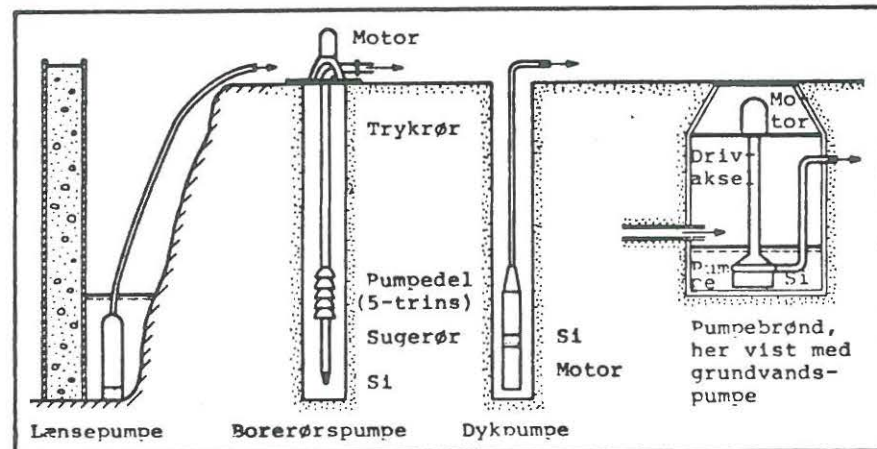
Stempelpumpen er en meget driftssikker pumpetype, der kan anvendes, hvor vandet har et stort luftindhold. Da den er dyr i drift, kan den ikke længere konkurrere med de mere moderne pumpetyper.

Løsepumpen er en centrifugalpumpe, der ofte anvendes, hvor grundvand skal pumpes bort fra samlebrønde, pumpebunde eller åbne udgravninger. Løsepumper er meget kompakte pumper, der er lette at flytte. De mindste pumper med ydeevne på  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  fylder  $\varnothing 20 \cdot 40 \text{ cm}$  og vejer 15 kg. Pumper med ydeevne på  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  fylder  $\varnothing 100 \cdot 120 \text{ cm}$  og vejer 550 kg. Løsepumpers største løftehøjde er normalt 150 m. Løftehøjden kan dog forøges ved at koble flere pumper i serie. Motoren er vandtæt indkapslet, så pumpen kan neddykkes i vand. Til brug i samlebrønde kan løsepumper udstyres med automatik, der starter og standser pumpen efter hvor meget vand, der er i brønden.

Borerørspumpen er en flertrins centrifugalpumpe, hvor antallet af trin bestemmes af den ønskede løftehøjde. Ved dybe filterbrønde er borerørspumpen uegnet på grund af akselfriktionen, og i stedet anvendes dykpumpe.

Dykpumpens arbejdsprincip er det samme som borerørspumpens, blot er motoren anbragt under pumpedelen, hvorved man undgår den lange aksel fra motor til pumpedel. Dykpumpen har f.eks. en ydeevne på  $250 \text{ m}^3/\text{h}$  og en største løftehøjde på 150 m. De mindste pumper kan anbringes i et 4" foringsrør.

Membranpumper er egnede til sugespidsanlæg med små sugehøjder ( $< 7 \text{ m}$ ) og med ujævn vandtilstrømning, idet denne pumpetype kan køre "tør" i lang tid uden at tage skade. Pumpens ydeevne i forhold til egenvægten er lille. En pumpe med ydeevne på  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  vejer ca. 800 kg.



Ejektorpumpen er egnet til oppumpning af små vandmængder ( $0,5-5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) fra stor dybde ( $\sim 130 \text{ m}$ ). En flertrins centrifugalpumpe anbragt i terrænhøjde er med to rør forbundet med en ejektor anbragt f.eks. i en filterboring. Gennem det ene rør pumpes vand under højt tryk ned til ejektoren, hvor det med stor hastighed passerer en dyse ind i et større kammer. Herved trækkes vandet i borehullet med op gennem det andet rør.

Mammutpumpen minder i princippet om ejektorpumpen. Pumpevirksomheden opnås her ved hjælp af trykluft, der føres ned til et kammer og blandes med vand. Da den luftblandede vædske har lavere rumvægt end det omgivende vand, vil blandingen presses op gennem stigrøret. Mammutpumper kan oppumpe ret store sten, men generelt er pumpens virkningsgrad ringe og driftudgifterne høje.

Monopumpen virker efter et snækkeprincip. Ved rotation af en ekscentrisk snække i et gummihylster vil vand, med selv ret stort indhold af sand og andre urenheder, presses igennem pumpen, der normalt kan præstere et tryk på 10-20 atm. Monopumpen kan i kraft af det høje tryk anvendes i forbindelse med skylleboring med bore-slam samt til nedspuling af sugespidsen.



### 7.3 GRUNDVANDSSÆNKNING

Grundvandssænkning benyttes ofte når bygninger med dybe kældre skal opføres. Ganske vist har metoden en del ulemper, men den kan på relativ billig måde løse de ofte komplicerede grundvandsproblemer.

Mindre grundvandssænkninger eller afvandinger kan udføres ved etablering af grøfter eller vandrette dræn i ringe dybde under jordoverfladen og bliver da som regel udført uden videre.

Større grundvandssækningsanlæg kan bestå af et omfattende system af filterbrønde og sugespidses, der er forbundet med rør til et større centralt pumpeanlæg eller består af en række dykpumper i hver sin filterbrønd. Anlægget kan i sig selv være dyrt, men først og fremmest betyder fejldisponering eller svigt af anlæg, at byggeriet forsinkes eller ødelægges, eller at jordbunden mister sin bæreevne.

Foruden forundersøgelsesmetoder må man derfor have egentlige dimensioneringsmetoder. Anvendelsen af teoretiske beregninger har dog i mange tilfælde ikke nogen mening, fordi jordbunden ikke egner sig til en teoretisk simplificering, og man må derfor benytte en anden fremgangsmåde, der sikrer at den fornødne effektivitet af anlægget altid er til stede, og som derfor normalt giver et overdimensioneret anlæg. I egne med roligt vekslende, næsten vandrette lagserier kan man derimod udføre en dimensionering af anlægget selv om der ikke findes nogen egentlig tradition for at gøre det. Der gives derfor i dette afsnit en oversigt over de almindeligste dimensioneringsmetoder.

#### FORDELE OG ULEMPER

Grundvandssænkning kan være en god løsning på mange problemer, men bør ikke anvendes ukritisk, da den også har mange ulemper. I det følgende vil blive anført nogle af de mulige ulemper og sekundære fordele.

Metodens primære formål er at sænke grundvandet, dens sekundære virkninger består i, at vandet bortpumpes, at det effektive spændingsniveau stiger, at der fremkaldes sætninger i bløde jordarter, og at der eventuelt også fjernes jord.

Ved mange grundvandssænkninger opdages, at vandspejlet var sekundært. Efter nogen tids pumpning kan anlægget sættes ud af drift. Hvis der er bygninger i nærheden funderet på træpæle, der har været neddykkede i grundvandet, kan de nu angribes af råd. Man kan endvidere vanskeliggøre andres indvinding af grundvand i nærheden. I kystegne kan der trækkes saltvand ind i jorden.

Når det effektive spændingsniveau stiger i sand eller siltlag, opnås der eventuelt en stabilisering af skråninger, hvis disse er i besiddelse af nogen kapillaritet. Skal man ramme pæle i bunden af byggegruben, kan det vanskeliggøres betydeligt, da pælens rammestand afhænger af det effektive spændingsniveau.

Hvis der er bløde jordlag af dynd eller ler, fremkalder det øgede spændingsniveau sætninger, hvorved bygninger i nærheden kan få store skader. Stabiliteten af bløde jordlag øges, og det kan være en ønskelig virkning.

Anvendelse af sugespidsanlæg kan betyde erosion omkring sugespidseserne, og dermed nedsat styrke af den omgivende jord. Sugespidses bør derfor ikke placeres i nærheden af pælespidses.

Ved en midlertidig grundvandssæknings ophør, må man være opmærksom på, at spændingsniveauet igen aftager, og at bæreevnen af fundamenter og pæle formindskes, samt at stabiliteten af skråninger igen forringes.

## JURIDISK ANSVAR

Grundvandssenkning, udgravning, pilotering og andre funderingsarbejder kan forårsage skade på andres ejendom, ofte med alvorlige økonomiske konsekvenser for entreprenørfirmaer og for projekterende ingeniører. Den projekterende ingeniør er således gjort ansvarlig for forhold, som han burde have vidst eller forudset eller har fortiet. For at undgå unødvendige skadeserstatninger og retssager kan det være klogt at inspicere naboejendomme og eventuelt fotografere de allerede eksisterende revner, således at man har det fornødne grundlag til at afvise uberettigede klager.

I henhold til byggelovens §42 påhviler der den, der lader sådant arbejde udføre, ansvaret for at der foretages alle nødvendige foranstaltninger til at hindre skader på anden mands ejendom, men der kan dog under visse omstændigheder pålægges ejerne af anden ejendom at deltage i udgifterne. Man bør derfor altid med den i loven fastsatte frist af 14 dage give underretning om arbejdet til såvel naboer som til bygningsmyndigheden og afæske sidstnævnte et påbud om foranstaltningernes art og omfang. Ansvar påhviler således principielt bygherren, men dennes rådgivere og entreprenører kan selvfølgelig blive medinddraget i sagen.

Retsforholdet mellem bygherre og entreprenør er normalt fastlagt ved "Almindelige betingelser for arbejder og leverancer" af 29.11.1972 (AB); hvoraf fremgår (§18):

Bygherre og entreprenør er - med de ændringer, som måtte følge af bestemmelserne i nærværende AB - ansvarlig overfor hinanden for udgifter vedrørende arbejdet, som ved fejl eller forsømmelse fra den ene parts side måtte være påført den anden part. Skader, som entreprenører måtte forvolde på hinandens arbejde, materiel og materialer, er bygherren uvedkommende.

§5, stk. 3 giver entreprenøren mulighed for at sikre sig mod et uheldigt projekt.

## SIKRING AF ANLÆG

En svigtende grundvandssenkning kan medføre stor skade på det i-gangværende byggeri. Bunden i byggegruben kan skyde op eller fundamenter ødelægges af flydejord og siderne i byggegruben bryde sammen. Det er derfor klart, at der må udføres en sikring af anlægget.

Man kan først danne sig et billede af, hvor hurtigt sikringen skal virke ved at standse pumperne og observere grundvandsstigningen. I moræneler kan en vandspejlsstigning eventuelt foregå så langsomt, at man kan nå at reparere pumpen, inden der sker noget. I lukkede gruslag med artesisk tryk kan trykket opbygges momentant, og der stilles her krav om højeste beredskab. I mellemtilfælde kan man eventuelt nå at fylde byggegruben med vand, hvis det er nødvendigt, og kravet til beredskabet kan da slækkes noget.

Højeste beredskab kan bestå af uafhængig strømforsyning, der træder i kraft automatisk ved strømsvigt udefra, samt en dublering af alle pumper, således at pumpevigt blot betyder, at en ny sættes igang. I tilfælde af sådanne uheld bør der være alarmering af folk, der øjeblikkelig kan gå igang med at udbedre skaden. Der kan endvidere etableres et automatisk alarmeringssystem, der træder i funktion, hvis grundvandet i pejlerørene stiger. Det kan for eksempel have betydning ved tilstopning af filtre.

Permanente anlæg sikres bedst ved at koncentrere fejlmulighederne et sted. Den nødvendige senkning opnås ved overløb fra enkeltbrønde til et åbent system, der afdrænes til en central pumpestation, der er forsynet med kraftreserver og ekstra pumper. Ved det åbne system opnås at systemet ikke er følsomt over for små utætheder. Permanente anlæg kan dog også være mindre følsomme over for driftsforstyrrelser, men det må erindres, at skader på færdige bygninger kan have stort økonomisk omfang (f.ex. tørdokker).



## GRUNDVANDSSÆNKNING 2

## JORDBUNDENS INDFLYDELSE

I homogene aflejringer af vandsedimenter kan man relativt enkelt dimensionere et grundvandssænkingsanlæg. Jorden kan opdeles i en række næsten vandrette lag af vekslende tykkelse og permeabilitet, hvorved grundvandsproblemet kan opdeles i en række underproblemer på overskuelig måde. Prøvepumpninger i sådanne lag giver brugbare resultater. I det følgende gennemgås derfor først metoderne i relation til homogene aflejringer: sand, silt og ler. Til sidst anføres fremgangsmåder ved grundvandssænkning i moræneaflejringer.

## GRUS OG GROFT SAND

Grus og groft sand har en meget stor vandføringsevne, og i mange tilfælde må man opgive at sænke grundvandet heri og i stedet afskære laget eller udgrave byggegruben under vand. Sådanne metoder omtales i afsnit 7.5. Er man nødt til at forsøge at foretage en grundvandssænkning, må man benytte store pumpe-sumpe med gruskastninger i bunden.

## SAND

I mellem- og finsand kan anvendes såvel filterbrønde som sugespidsanlæg.

Filterbrønden er generelt den mest anvendelige, fordi den kan tilpasses såvel sand- og gruslag ved at anvende store diametre og grove filtre, som finkornede jordarter ved at anvende et tilpas fint filtermateriale i yderste filterlag. Afvekslende lag af større eller mindre vandføringsevne kan alle drænes til samme brønd ved at afpasse filterstrækningen efter forholdene.

Filterbrønden kan også tilpasses enhver dybde, hvortil grundvandet ønskes sænket. Ved små sænkninger (4-5 m under terræn) kan en pumpe gennem en rørledning trække vand fra mange brønde, idet vandmængden fra hver brønd må kunne reguleres for at undgå luft i systemet. Der anvendes bedst stempelpumper, der kan arbejde selv med noget tilløb af luft.

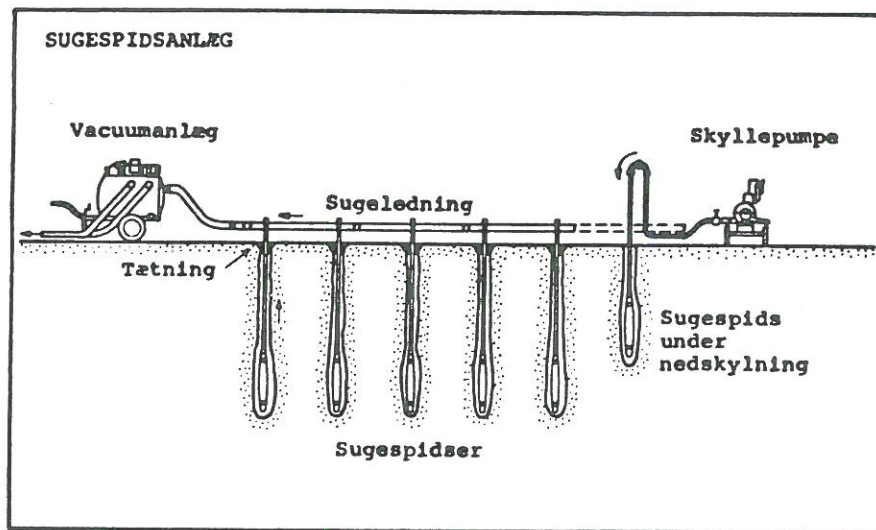
Ved større sænkninger må pumpen anbringes i bunden af brønden, enten ved at anvende de moderne dykpumper eller ved at anvende en grundvands- eller borerørspumpe, hvor pumpedelen er nedsænket i vandet, men motoren står oven for hullet og er i forbindelse med pumpen gennem et rør med en aksel i. Man opnår, at pumpen skal trykke i stedet for at suge, og at tilstrømmende luft derfor ikke er noget problem. Der kan anvendes centrifugalpumper.

Hvis grundvandssænkningen skal foregå permanent, må kravet til driftssikkerhed være meget stort, og enhver indflydelse af utætheder i systemet må undgås. Filterbrøndene udføres derfor som overløbsbrønde (uden pumper), hvorfra vandet løber gennem en samleledning eller en åben rende til en pumpestation. I mange tilfælde kan filterbrønden med fordel kombineres med et fladedræn.

En speciel anvendelse af overløbsbrønden er sænkning af artesiske grundvandsspejl, hvor vandet kan ledes til en å eller grøft uden pumpning. Et sådant anlæg er kun følsomt over for tilstopning af filtre.

Sugespidsanlæg består af een pumpestation, der gennem en hovedledning står i forbindelse med sugespidserne, der normalt anbringes med 1-2 m's afstand. Sugespidserne kan højst sænke grundvandsspejlet 5-6 m, men ved trinvis anlæg af sugespidsen kan den ønskede dybde nås. Da slidsebredden som regel er over 0,3 mm, kan man forvente at finsand passerer gennem slidse og ind i systemet. Ved passende vandhastigheder ( $> 0,5$  m/sec) kan finsandet dog rives med, hvorved tilstopning undgås. Til gengæld skal pumpen kunne tåle passagen af finsandet. Ved bortrivning af finsand fra jorden nærmest sugespidsen opnås en bedre filtervirkning og en større ydeevne af anlægget. På et sugespidsanlæg vil man i dag næsten altid anvende to pumper, idet en vacuumpumpe sørger for at frasortere luften, således at den egentlige pumpe til stadighed kan være effektiv.

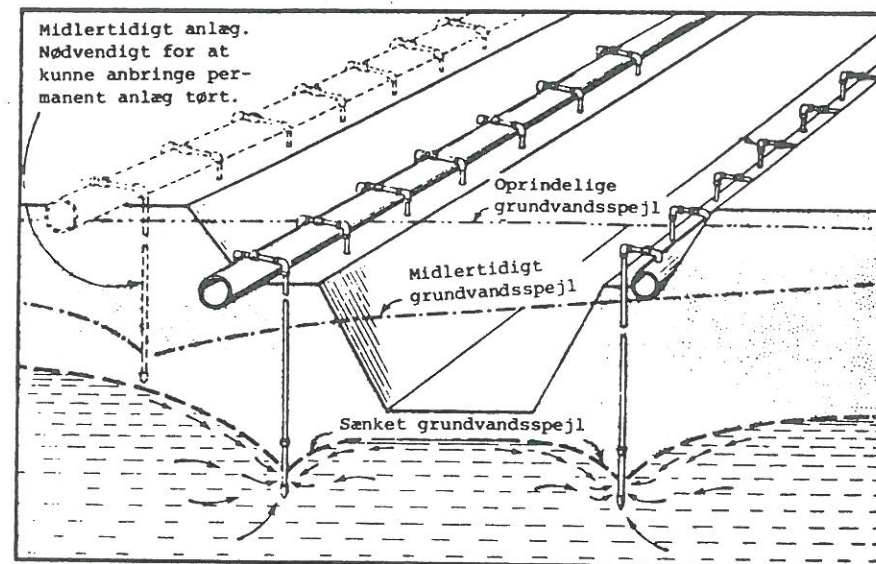
## FINSAND OG GROVSILT



I finere jordarter ( $0,2 \text{ mm} > d_{10} > 0,02 \text{ mm}$ ) foregår vandtilstrømningen meget langsomt, og grundvandssænkningen bliver først effektiv efter lang tids forløb. Man kan derfor foretage en såkaldt vacuum-sænkning, hvorved trykniveauet i brønden sænkes så meget som muligt, og virkningen af den enkelte brønd øges. I endnu mere fin-kornede jordarter fremmer vacuum ikke sænkningen nok. I udlandet har man med held fremskyndet vandbevægelsen ved at påtrykke jord og brøndsystem et elektrisk felt. (Elektrosmose).

## LER

I ler er vandbevægelserne så langsomme, at bygværket vil kunne fuldføres, før der er sket erosioner eller opblødninger. Kan der forekomme vandførende lag, der kan løfte bunden af byggegruben, må der placeres en række aflastningsbrønde, der når lige så langt ned under byggegrubens bund, som bunden ligger under jordoverfladen. Med mulighed for artesisk tryk øges dybden tilsvarende.



## MORÆNELER

Istidsaflejringer er inhomogene med afvekslende lag af leret, sandet eller stenet karakter. Sten- og lerlag kan forhindre nedskylning af sugespids, medens filterbrønde altid kan etableres.

Resultatet af prøvepumpningen kan ikke regnes repræsentativt for hele området. Ved etablering og pumpning på et helt anlæg vil man konstatere, at mens nogle brønde er meget effektive, kan der ikke konstateres vandtilstrømning til andre. Man kan ikke på planlægningsstadiet vide, hvor mange brønde der er brug for, og man må derfor ud fra en eventuel prøvepumpning overdimensionere antallet af brønde noget. Ved selve borearbejdet for brøndene får man en række detailoplysninger. Brønde, der må skønnes ikke at have nogen effekt, fordi der kun er truffet lidet vandførende lag, fyldes op med grus, og tjener til aflastningsbrønde. De øvrige brønde etableres med filter og pumpe.



## GRUNDVANDSSÆNKNING 3

## DIMENSIONERING (LUKKET STRØMNING)

## SUPERPOSITION

På side 7.5 blev gennemgået den analytiske løsning af vandtilstrømning til een brønd på grundlag af en differentiaalligning. Da den er lineær i  $h$  kan virkningen af flere brønde findes ved superposition.

Man får således:

$$h = \frac{1}{2\pi kt} \sum_{i=1}^{i=n} Q_{wi} \ln r_i + \text{konst} \quad (7.17)$$

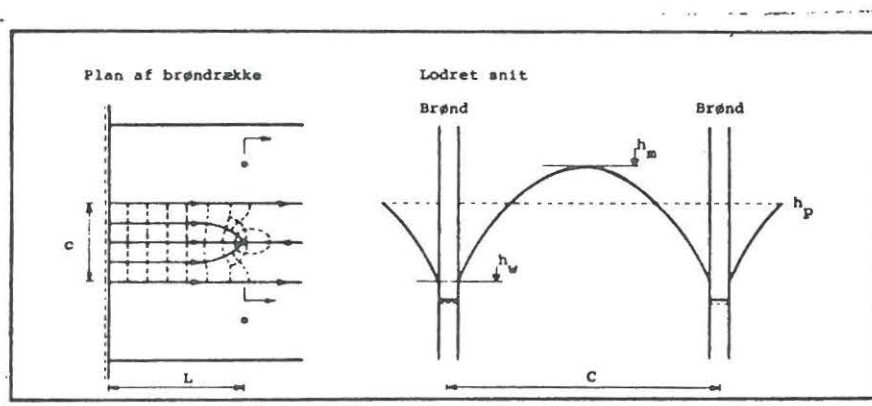
hvor  $r_i$  er afstanden til brønd  $i$  og  $Q_{wi}$  er samme brønds vandføring.

Anbringes et antal brønde langs periferien af en byggegrube, kan kravet om en bestemt værdi af  $h$  i et bestemt punkt (f.ex. midten af byggegruben) bestemme konstanten.

Man opnår dog et bedre overblik over anlægget ved at betragte brøndrækken som en grøft og de enkelte brøndes indflydelse som lokal.

## BRØNDRÆKKE

En brøndrække består af ens brønde med samme indbyrdes afstand  $c$  og med samme afstand  $L$  fra en retlinet kyst. Strømningen deles op af en række skillestrømslinier i områder, hvor vandet løber til hver sin brønd. Ved kysten haves med god tilnærmelse en parallelstrømning, og først lokalt omkring den enkelte boring kan der observeres en sænkningstragt. På figuren er sænkningstragten skåret igennem. Vandspejlet står højere imellem brøndene, fordi noget af vandet passerer brøndrækken og løber til brønden bagfra. Først beregnes trykniveauet  $h_p$  i brøndrækken svarende til parallelstrømning.  $h_p$  er også trykniveauet langt bag ved brøndrækken. Den ekstra sænkning  $\Delta h_w$  i brønden og trykniveauet mellem brøndene  $h_m$  beregnes af



$$\Delta h_w = h_p - h_w = \frac{Q_w}{2\pi kt} \ln \frac{c}{2\pi r_w} \quad (7.18)$$

$$h_m = h_p + \frac{Q_w}{2\pi kt} \ln 2$$

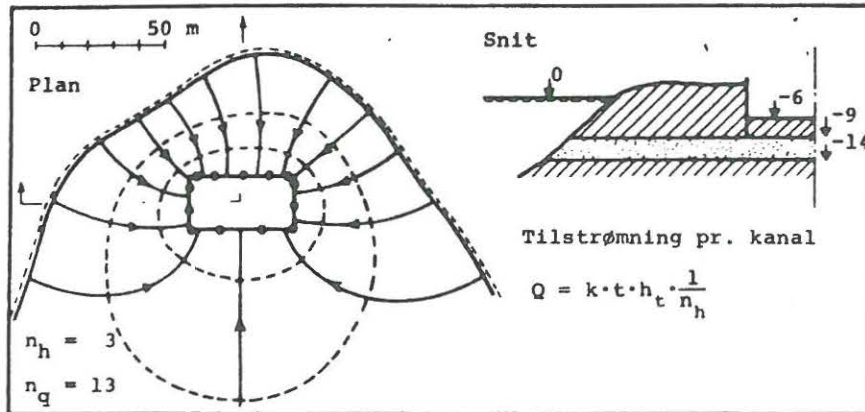
Er kysten eller brøndrækken ikke retlinet, kan  $h_p$  beregnes af et strømnet.

## STRØMNET

Strømningen i et lukket lag af ens tykkelse er nødvendigvis en plan strømning. De analytiske løsninger kan derfor i princippet illustreres ved vandret liggende strømnet, således som det ses af figuren på næste side. Dog bliver sådanne strømnet meget unøjagtige nær brønden på grund af dens ringe udstrækning.

Tænker man sig derimod brønden erstattet af en lukket grøft omkring en byggegrube, kan strømnettet benyttes med stor fordel fremfor en analytisk løsning, fordi man herved kan tage hensyn til et uregelmæssigt forløb af åen eller kystlinien og en uregelmæssig form af byggegruben.

## BEREGNINGSEKSEMPEL



Der ønskes foretaget en grundvandssænkning omkring en byggegrube nær en kyst, hvor forholdene er som angivet på tegningen. Der ønskes placeret en række brønde, således at vandmængden pr. brønd er konstant, og således at trykniveauet under byggegruben sænkes til mindst kote -7. Trykniveauet i havet  $h_o$  regnes til 0.

Idet byggegrubens begrænsning betragtes som en grøft, kan det viste strømnet tegnes og trykfaldet  $h_o - h_p$  beregnes, idet  $Q$  er tilstrømningen pr. kanal. Trykniveauet  $h_p$  er med tilnærmelse trykniveauet midt under byggegruben. Anbringes en brønd pr. kanal, fås  $c_{\max} = 15$  m, og  $Q = Q_w$ . Sandets permeabilitet er  $k = 10^{-4}$  m/s. Det største trykniveau på begrænsningen er  $h_m$  (formel 7.18).

$$h_m = \frac{Q_w}{kt} n_h + \frac{Q_w}{2\pi kt} \ln 2 = -6,2 \cdot 10^3 Q_w$$

med  $h_m = -7$  m, bliver  $Q_w = 1,2 \cdot 10^{-3}$  m/sec.

Brøndenes udvendige radius er  $r_w = 0,25$  m. Trykniveau i brønd B (uden filtertab) er

$$h_w = h_p - \Delta h_w = \frac{Q_w}{kt} n_h - \frac{Q_w}{2\pi kt} \ln \frac{c}{2\pi r_w} = -8 \text{ m}$$

Da  $h_w > -9$  m, er der positivt vandtryk i det vandførende lag. Havde  $h_w$  været  $< -9$  m, måtte vacuummetoder om muligt anvendes.

Beregningen kan også gennemføres ved at anvende superpositionsprincippet ifølge formel (7.17). Imidlertid er det vanskeligt at fastlægge konstanten i dette tilfælde, fordi afstanden til kystlinjen ikke er stor i forhold til byggegrubens udstrækning, og herved vil alle efterfølgende beregninger blive behæftet med stor usikkerhed. På side 7.24 er gennemregnet et mere velegnet eksempel efter begge metoder.

## MÅLING AF VANDMÆNGDER

Som en kontrol på anlæggets virkemåde kan man måle den udstrømmende vandmængde. Aftager vandmængden, kan det være tegn på, at et sekundært reservoir er tømt, men det kan også tænkes, at en eller flere af brøndene ikke virker, enten fordi filtret er tilstoppet, eller fordi der er sluppet for meget luft ind i systemet.

Er vandmængden lille, kan man holde en spand ind i strålen og måle, hvor hurtigt den fyldes. Med større vandmængder kan man lade vandet løbe ned i et kar, der er forsynet med et hak på kanten. Hakket kan forsynes med en skala, der angiver vandmængdens størrelse. Man kan her anvende en hydraulisk beregning af skalaen, fordi strålen alene består af vand. Man kan derimod ikke anvende udløbet på røret fra anlægget, fordi det ikke altid er fuldtløbende.

Af samme årsag må vandure og venturirør også anses for uegnede.



## GRUNDVANDSSÆNKNING 4

## DIMENSIONERING (ÅBEN STRØMNING)

## SUPERPOSITION

På side 7.7 er vist, at den analytiske løsning på tilstrømning til en brønd i en åben strømning med god tilnærmelse er lineær i  $h^2$ , hvorfor superpositionsprincippet kan anvendes for  $h^2$ :

$$h^2 = \frac{1}{\pi k} \sum_{i=1}^{i=n} Q_{wi} \ln r_i + \text{konst} \quad (7.19)$$

hvor  $r_i$  er afstanden til brønd  $i$  og  $Q_{wi}$  er brønd  $i$ 's vandføring.

## BRØNDRÆKKE

En brøndrække i en åben strømning kan betragtes som sammensat af en grøft med trykniveau  $h$  og en lokal virkning omkring brøndene. Med symbolerne fra side 7.21 fås (af 7.7):

$$h_o^2 - h_p^2 = \frac{2Q_w \cdot L}{k \cdot c}$$

og fra brøndene:

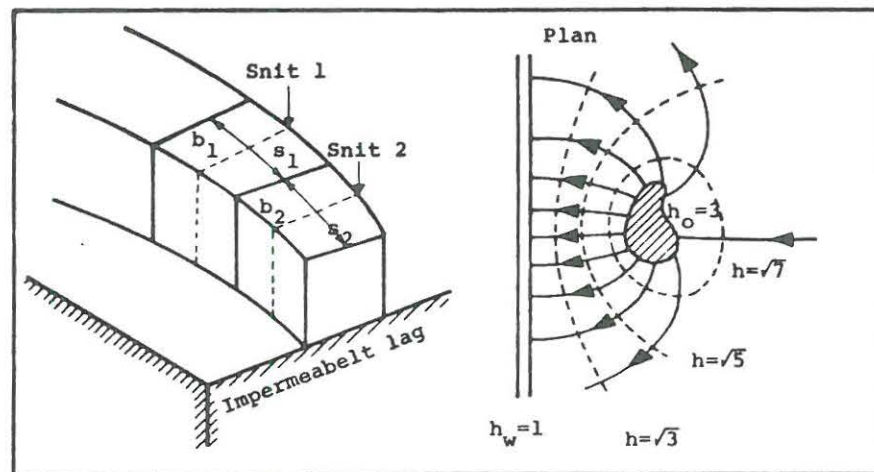
$$\begin{aligned} h_p^2 - h_w^2 &= \frac{Q_w}{\pi k} \ln \frac{c}{2\pi r_w} \\ h_o^2 - h_w^2 &= \frac{2Q_w \cdot L}{k \cdot c} + \frac{Q_w}{\pi k} \ln \frac{c}{2\pi r_w} \\ h_o^2 - h_m^2 &= \frac{2Q_w \cdot L}{k \cdot c} - \frac{Q_w}{\pi k} \ln 2 \end{aligned} \quad (7.20)$$

Hvis udregningen foretages på grundlag af et strømnet, må  $L/c$  erstattes af  $n_h/n_w$  ifølge formel (7.21), hvor  $n_w$  er antal brønde pr. strømkanal.

## VANDRETTE STRØMNET FOR ÅBNE STRØMNINGER

Strømninger i lukkede lag er plane strømninger og kan derfor løses ved optegning af vandrette strømnet.

I åbne strømninger kan strømnetsmetoden anvendes i tillempet form ved at anvende Dupuits princip. På figuren ses en enkelt strømkanal med lodrette potentialflader, der set fra oven skærer strømlinierne under rette vinkler. Trykniveauet i de tre flader er hen-



holdsvis  $h_1$ ,  $h_2$  og  $h_3$ . Den vandmængde  $Q_1$ , der løber gennem snit 1 er

$$Q_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot b_1 \cdot k \cdot \frac{h_1 - h_2}{s_1} = \frac{1}{2} k \frac{b_1}{s_1} (h_1^2 - h_2^2)$$

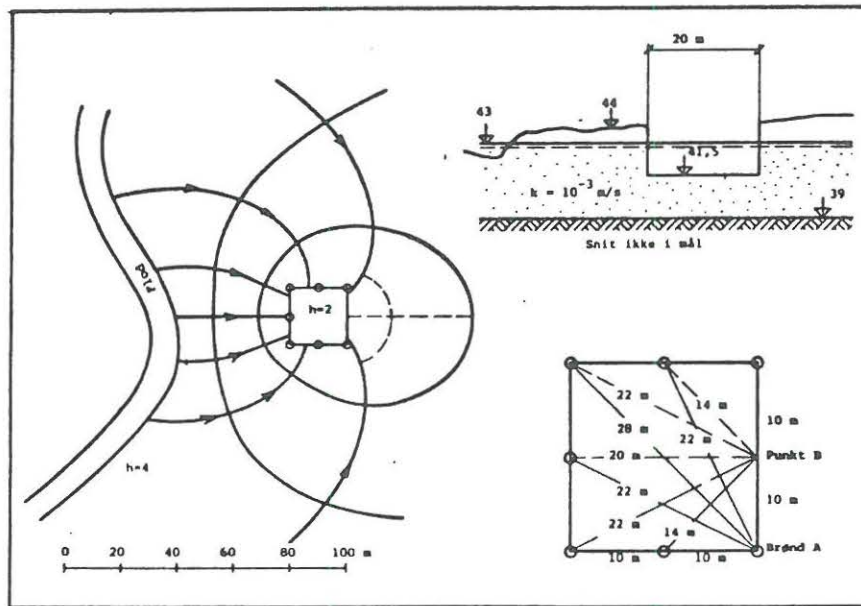
og analogt i snit 2:  $Q_2 = \frac{1}{2} k \frac{b_2}{s_2} (h_2^2 - h_3^2)$ . Vælges  $\frac{b_1}{s_1} = \frac{b_2}{s_2} = \frac{b_n}{s_n} = 1$ , fås  $h_n^2 - h_{n-1}^2 = \text{konst} = \Delta(h^2)$ , idet  $Q$ 'erne af kontinuitetsgrunde er ens. Den samlede vandføring fås af:

$$Q = \frac{1}{k} \Delta(h^2) \cdot n_q = \frac{1}{2} k (h_o^2 - h_p^2) \frac{n_q}{n_h} \quad (7.21)$$

På figuren er vist et eksempel, hvor en grøft afvander et område med en nærliggende sø. Det impermeable lags overside ligger 1 m under vandspejlet i grøften, og søens vandspejl ligger 2 m over grøftens vandspejl. Potentialet i grøft og sø er dermed givet. Potentialerne er påskrevet; vandmængden findes til

$$Q = \frac{1}{2} k \cdot 8 \cdot \frac{11}{4} = 11k \text{ m}^3/\text{sec}$$

## BEREGNINGSEKSEMPEL



Der ønskes foretaget en grundvandssænkning omkring en byggegrube nær en flod som vist på figuren. Der ønskes placeret en række ens brønde med samme vandføring  $Q_w$  og trykniveauet ønskes sænket til under kote 41,5. Ved forsøg er fundet at en filterbrønd med  $r_w = 0,1$  har et filtertab på  $h_f = 0,7$  m.

Idet flodens og byggegrubens begrænsning kan betragtes som en potentiallinje kan optegnes et strømnet med ækvidistance i  $h^2$ , således som vist på figuren. Af 7.21 fås den samlede vandtilstrømning

$$Q = \frac{1}{2}k(h_o^2 - h_p^2) \frac{n_q}{n_h}$$

$h_o$  og  $h_p$  udregnes fra lagets underside. Placeres 1 brønd pr. kanal med  $r_w = 0,1$  m fås:

$$Q_w = \frac{1}{2}k(16 - 4) \frac{1}{3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Laveste trykniveau fås i en brønd  $h'_w = h_w - h_f$

$$h_o^2 - h_w^2 = (h_o^2 - h_p^2) + (h_p^2 - h_w^2) = 12 + \frac{2}{\pi} \ln \frac{20}{2\pi \cdot 0,1} = 14,2$$

$$h_w = \sqrt{16 - 14,2} \text{ m} = 1,35 \text{ m}$$

Da  $h'_w$  altså bliver 0,65 m, kan sænkningen udføres.

Midt mellem brøndene bliver

$$h_o^2 - h_m^2 = 12 - \frac{2}{\pi} \ln 2 = 11,56$$

$$h_m = \sqrt{16 - 11,56} = 2,10 \text{ m, hvilket også kan accepteres.}$$

Beregningen kan også udføres ved superposition efter formel 7.17. Betragtes hele byggegruben som en enkelt brønd nær kysten, fås en gennemsnitsafstand på ca. 80 m. Ifølge første figur på side 7.6 er rækkevidden af systemet da 160 m. Dette resultat gælder også for en åben strømning. Oppumpes det samme som før, nemlig  $14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  fra hele byggegruben fås konstanten i summationsformlen 7.19:

$$h^2 = \frac{14}{\pi} \ln 160 + \text{konst} = 16 \text{ m}^2$$

$$\text{konst} = 16 - 22,62 = -6,62 \text{ m}^2$$

Trykniveauet i en brønd afhænger af afstanden til de øvrige brønde og varierer fra brønd til brønd. Brønd A's trykniveau findes:

$$h_w^2 = \frac{2}{\pi} [\ln 10 + 2 \ln 20 + 2 \ln 22 + \ln 28 + \ln 0,1] - 6,62$$

$$= 3,25 \text{ m}^2$$

$$h_w = 1,80 \text{ m}$$

Trykniveauet mellem to brønde (f.ex. i punkt B) findes til:

$$h_m^2 = \frac{2}{\pi} [2 \ln 10 + 2 \ln 14 + 2 \ln 22 + \ln 20] - 6,62 = 5,51 \text{ m}^2$$

$$h_m = 2,35 \text{ m}$$

Eksemplet viser, at de to beregningsmetoder, der hver indeholder visse tilnærmelser, dog giver resultater, der ikke afviger meget.



## 7.4 PERMANENTE FORANSTALTNINGER

### DRÆNING AF TERRÆNSPRING

Konstruktioner, der er bygget under primære eller sekundære vandspejl, bliver påvirket af vandtryk. Der er endvidere mulighed for at gennemslivende vand kan forvolde skade.

Vælger man at gøre konstruktionen tæt overfor vandgennemslivning, men intet gør for at fjerne vandtrykket, taler man om isolering mod grundvand eller membranisolering.

Vælger man at forsøge at fjerne vandet, inden det når at gøre skade, taler man om dræning. Ved nogle drænforanstaltninger sænkes det primære vandspejl og i sådanne tilfælde udgør dræningen altså en permanent grundvandssænkning, og det bør indgå i overvejelser om en sådan sænkning kan tillades (se side 7.17). Normalt vil kun små grundvandssænkninger kunne tolereres.

#### DRÆNING

Drænforanstaltninger kan medføre meget store besparelser på de konstruktioner, hvor vandtrykket ellers har afgørende indflydelse på udformningen. Som eksempel kan nævnes en støttemur, hvor momentet fra vandtrykket på murens bagside udgør det væsentlige bidrag ved dimensioneringen af tåens bredde. På figuren ses to alternativer. Udførelsesmåden bygger ofte på praktiske erfaringer, og kan derfor være meget forskelligartede. Det er ikke meningen her at forsøge at give et overblik over alle disse muligheder men blot at angive de meget simple konstruktionsprincipper samt nogle karakteristiske eksempler på anvendelsen.

Dræningsarrangementet består af en permeabel del, filtret, der opfanger vandet og et drænrør, der leder vandet bort til en recipient. Det er væsentligt at sørge for, at systemet kan fungere, altså at filtret ikke tilstoppes af den omgivende jord, at filtret ikke tilstopper drænrøret (se side 7.14), samt at drænrør og recipient ikke fryser til om vinteren eller af anden grund tilstoppes.

#### SAND

Er konstruktionen omgivet af sand eller grus, kan drænsystemet bestå af et drænrør, evt. omgivet af et mindre filter. Grundvands-

spejlet vil herefter blive sænket til drænrørets niveau. Ved at lægge drænrøret i funderingsniveau undgås vandtryk på konstruktionen.

#### SILT ELLER LERFYLD

Der må opbygges et filter, der afskærmer hele konstruktionen mod jorden, da den kapillære stighøjde ofte er så stor, at jorden er vandmættet flere meter over grundvandsspejlet. Herved kan der overføres vand til konstruktionen med udblomstninger og fugtighed på konstruktionens frie side til følge.

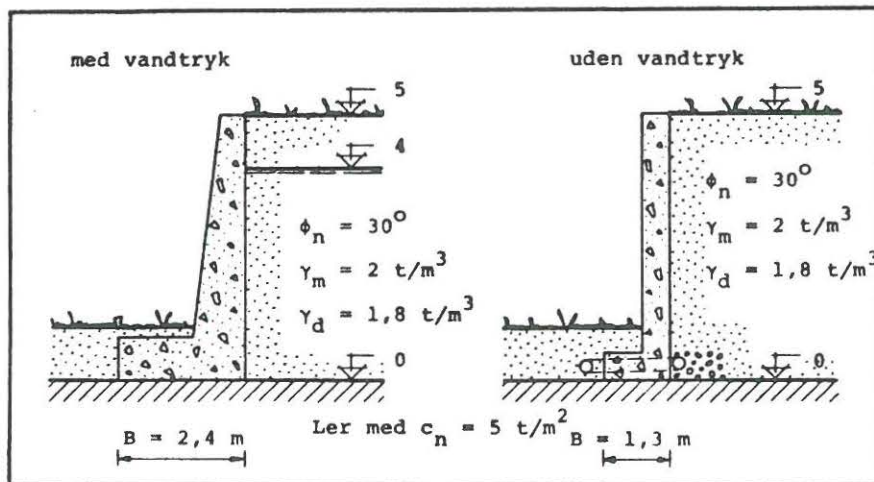
Denne type jord er frostfarlig. Der kan dannes store islinser i frostzoner med et kraftigt forøget tryk på konstruktionen til følge. Er der mulighed for at jorden fryser nær ved konstruktionen (f.eks. en støttemur), må drænsystemet derfor udformes således, at kapillariteten brydes (se figur på næste side).

I fed ler kan konstruktionen i sig selv virke som dræn og vandmængderne være så små, at de ikke volder gener. Den forskriftsmæssige udluftning af kælderrum vil således kunne holde kælderrumme tørre.

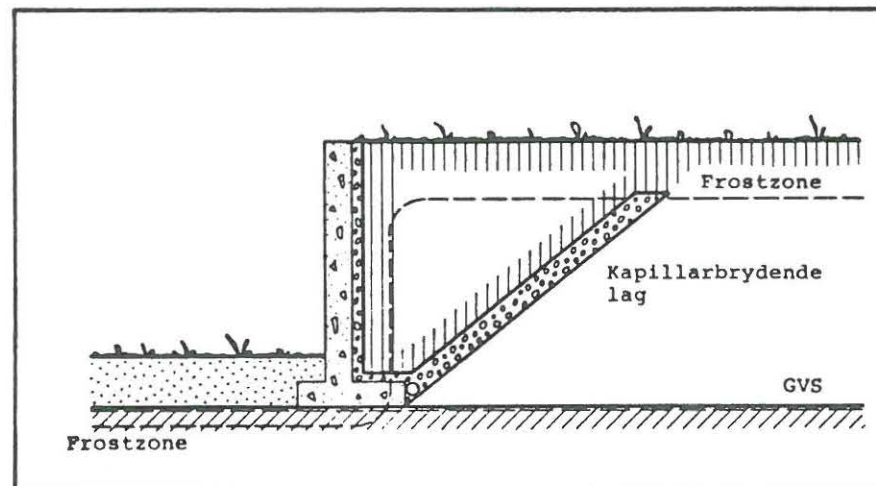
Vandtrykket på kældermuren er forsvindende lille, og det kunne derfor være fristende at se bort fra vandtrykkets indflydelse. Som figuren viser, betyder strømmingen hen mod kældervæggen, at leret påvirkes af strømkrafter, der peger hen mod væggen og betyder et forøget jordtryk på væggen. Man må derfor vælge enten at dimensionere for vandtrykket, som om væggen ikke virker som dræn, eller man kan se bort fra vandtrykket på væggen, men må da medregne strømningskrafterne i jordtrykket. Det bemærkes iøvrigt, at strømkrafternes størrelse ikke afhænger af vandmængden.

Over leret vil som regel befinde sig et permeabelt lag af fyld eller muldjord. Heri kan vandet løbe, eller vandet kan løbe langs jordoverfladen hen til konstruktionen. Er der nogen risiko for dannelse af en sprække mellem jord og konstruktion, må man derfor ved passende tætningsforanstaltninger hindre vandet i at løbe ned i sprækken og opbygge et vandtryk.

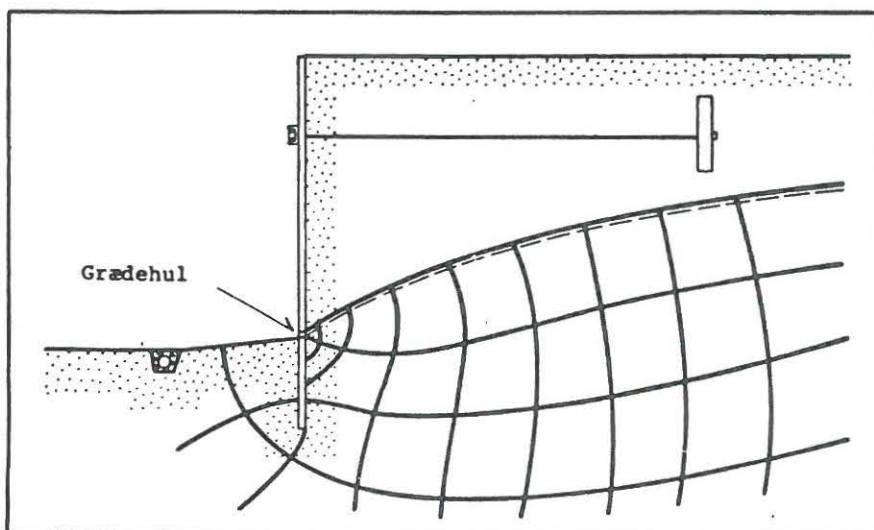
Støttemur i sand



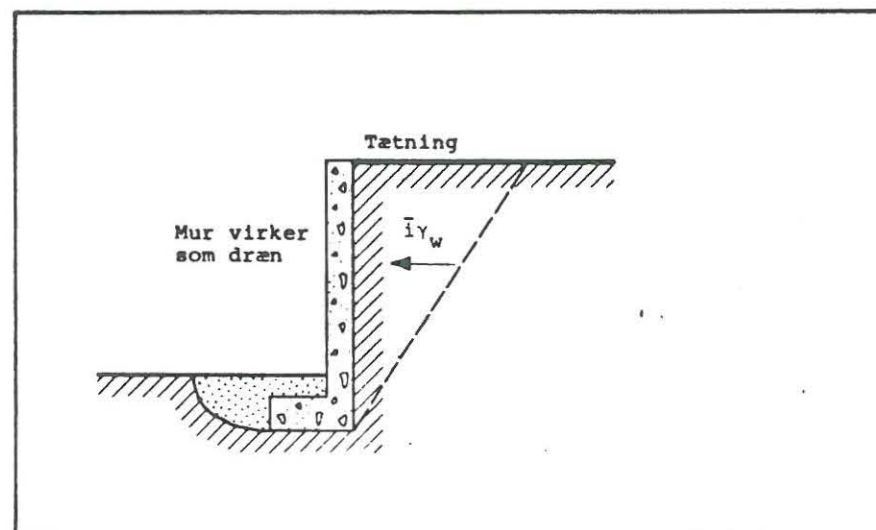
Dræning i siltholdigt fyld



Spunsvæg i sand



Dræning i ler





## PERMANENTE FORANSTALTNINGER 2

### DRÆNFORANSTALTNINGER VED BYGNINGER

#### FUNDERINGSNIVEAU OVER GRUNDVANDSSPEJL

Forudsat at grundvandsspejlet står i eller under funderingsniveau, er det hensynet til regn, tøj eller ledningsbrud, der betinger udformningen af drænsystemet. I meget fed ler kan det dog eventuelt udelades.

Kældergulvet beskyttes ved udlægning af fladedræn af 15-20 cm's tykkelse. Er grundfladen meget stor, kan fladedrænet suppleres med et underliggende netdræn med et maskeareal på ca. 30-50 m<sup>2</sup> (det kan under visse forudsætninger dimensioneres, se side 7.12). Fladedrænet står i forbindelse med et omfangsdræn, hvorfra vandet ledes til kloak gennem en brønd med vandlås, ved separatsystemer til regnvandssystemet. Er der fare for stuvning i kloaksystemet, må der etableres en pumpebrønd, (se f.eks. side 7.16), hvorfra vandet pumpes op i en passende overhøjde. Kældervæggen kan på lignende måde beskyttes af et lodret, 20 cm tykt fladedræn, der også står i forbindelse med omfangsdrænet. Tilkastes udgravningen med sandfyld, er det lodrette fladedræn dog ikke nødvendigt. For at hindre for stor tilstrømning til omfangsdrænet, kan der udlægges et lag lerfyld ved kældervæggen, eller eventuelle fliser kan gives fald bort fra huset.

#### FUNDERINGSNIVEAU UNDER GRUNDVANDSSPEJL

Står grundvandsspejlet over funderingsniveau, fører de ovennævnte foranstaltninger til en grundvandssænkning, der f.eks. kan forvoldes skade på naboejendomme, og derfor normalt ikke kan tolereres, bortset fra ganske små sænkninger.

Man vil i sådanne tilfælde tolerere vandtryk på bygningerne, og enten foretage en dræning inde i selve kældervæggen (indskudsdræn) eller forsyne den med en vandtæt membran (isolering).

Hvis kældergulv og kældervæg bygges dobbelt som kinesiske æsker med indskudsdrænet liggende i mellemrummet og den yderste kælder- væg gående op over grundvandsspejlet, vil den yderste væg hindre

at grundvandet sænkes nævneværdigt, og indskudsdrænet vil opfange det vand, der siver gennem det ydre system. Konstruktionen skal kunne optage det fulde vandtryk enten på den ydre eller den indre skal, idet indskudsdrænet kan overføre trykspændinger fra den ene skal til den anden. Normalt skal den indre væg alligevel armeres, da den skal bære husets vægge, og det er da naturligt også at armere den for vandtryk. Den ydre væg bør dog udføres i så god beton som muligt for at reducere vandgennemstrømningen, og man vil derfor ofte i dag lade den ydre væg være bærende. Indskudsdrænet drænes til en pumpeump, hvorfra vandet pumpes op i en kloak.

#### DRÆNMATERIALER

Foruden singels eller grus, der er de mest anvendte drænmaterialer, er der udviklet en række materialer til denne opgave.

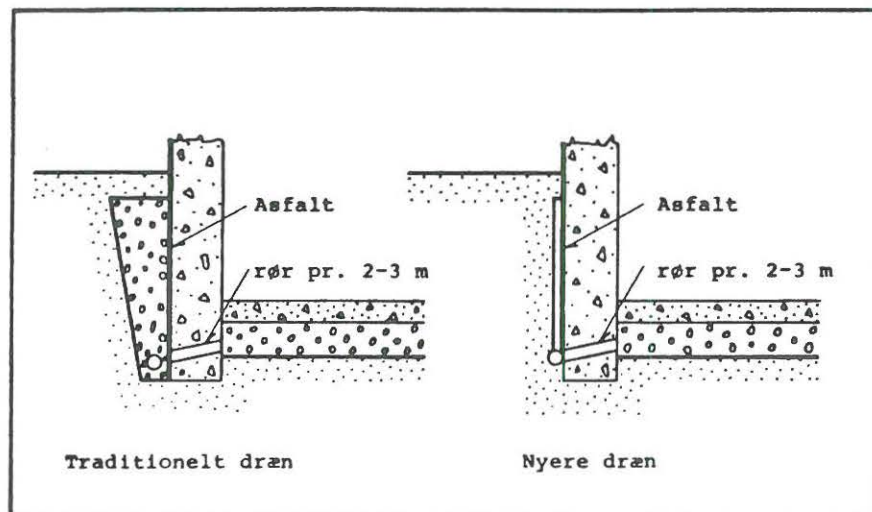
Til indskudsdræn kan således anvendes højporøse letbetonsten, hvorved dobbeltforskallingen i mellemrummet mellem dobbeltvægge og -gulve undgås.

Til dræn på ydersiden af kældervægge er der udviklet såvel stenfiber- som glasuldsplader, der oven i købet bevarer en vis isolerende virkning. Der findes også specielle drænplader af beton med langsgående huller.

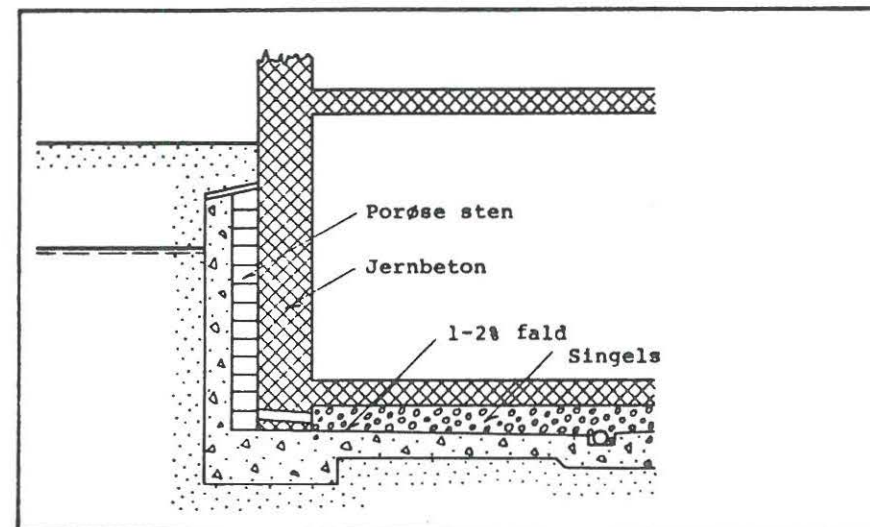
#### FUGTISOLERING

Foruden et egentligt drænarrangement, bør der naturligvis i fornødent omfang isoleres mod fugt med diffusionstætte materialer anbragt på de rette steder. Problemet behandles ikke her, da det betragtes som hørende til husbygnings fagområde. Det bør dog nævnes, at man som oftest tjærer en kældermur på ydersiden, selv om det nødvendige dræningsarrangement findes. Tjæren tjener dels som en forøget sikkerhed mod vandgennemgang ved svigtende dræn og dels som fugtisolering.

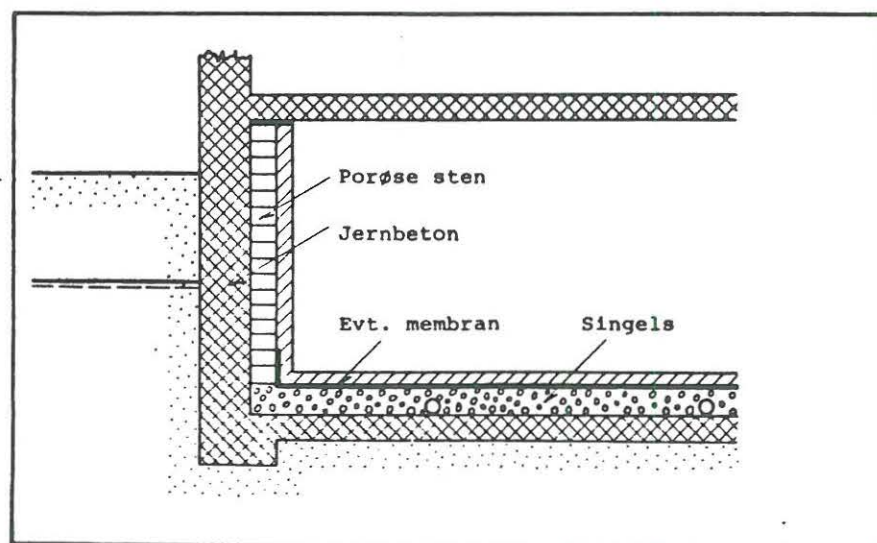
Dræning af kældre



Udvendigt indskudsdræn



Indvendigt indskudsdræn





## PERMANENTE FORANSTALTNINGER 3

## MEMBRANISOLERING

Bygninger, der funderes under grundvandsspejlet, forsynes normalt med indskudsdræn eller isoleres fra grundvandet af en membran. I nogle tilfælde forsynes bygningen både med membran og indskudsdræn.

Membranen kan være udført i såvel plastik, som kunstgummi eller bitumen. Specielt har bitumenmembranen i dag stor anvendelse fordi den kan udføres af ufaglært arbejdskraft, medens plastik og kunstgummimembraner må udføres af specialfirmaer for at undgå utætte samlinger.

Bitumenmembranen fås i store ruller. Den ene side af membranen er forsynet med et lag imprægneret beskyttelsespapir, medens den klæbende side er belagt med et lag plastikfolie, der rives af under udlægningen. Ved overlappning og sammentrykning opnås øjeblikkelig tæthed. Hjørner, samlinger og andre udsatte steder bør forstærkes med et ekstra lag. Membranen tørrer ikke ud og sprækker derfor ikke og er heller ikke frostfølsom inden for det normale temperaturinterval. Membranen bør udlægges på et lag stenfrit beton, hvis overflade primes med bitumen.

Membranisoleringen bør naturligvis altid ligge på ydersiden af den bærende konstruktion. Anbringes den på indersiden, vil membranen kunne give efter for vandtrykket, og vandlommer dannes under membranen.

Membranisoleringens svage punkter er foruden hjørner og kanter, også indføringsstederne for kloakrør, hvis placering er givet af afløbsforholdene. Man vil søge at begrænse afgangsrørene fra det interne system mest muligt, helst kun en eller to udførsler gennem membranen. Er bygningen pælefunderet, kan pælenes længdearmering ikke på normal vis indstøbes i jernbetondækket, da det vil være umuligt at tætnes denne overgang. Trykpæle skæres derfor af under kældergulvet. Trækpæle skal nødvendigvis have forbindelse med konstruktionen, og man må da enten anvende stålpæle, der ikke er porøse eller opgive at tætnes gulvet fuldstændig med membranen.

Figuren viser et eksempel på membranisolering. I en tørholdt byggegrube er støbt fundament og et renselag, hvorpå er udstøbt et tyndt pudslag i cementmørtel. Efter at membranen er udlagt, udstøbes et nyt pudslag for at beskytte membranen. Herefter er jernbetonen støbt og væggen yderside afrettet med cementmørtel. Efter anbringelse af membran indstøbes den igen i cementmørtel og beskyttes mod jord af et skjold i fundamentsblokke. Membranen er ført knap 0,5 m over GVS og ender under en vandnase. Der findes naturligvis mange andre måder at etablere membran på, og man bør i hvert enkelt tilfælde konsultere de firmaer, der skal etablere membranen, for at opnå det bedste resultat.

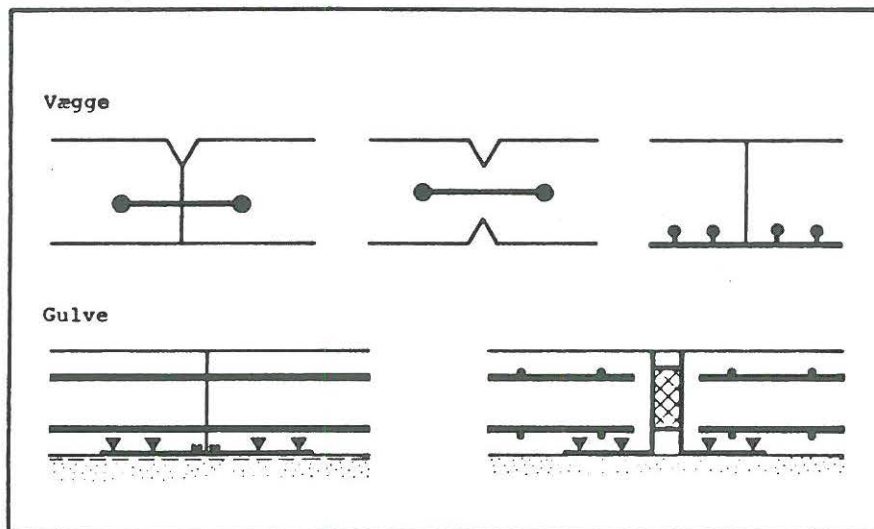
## VANDTÆT BETON

Istedet for en membranisolering på betonvæggen eller -pladens yderside kan man udføre væggen eller pladen i vandtæt beton.

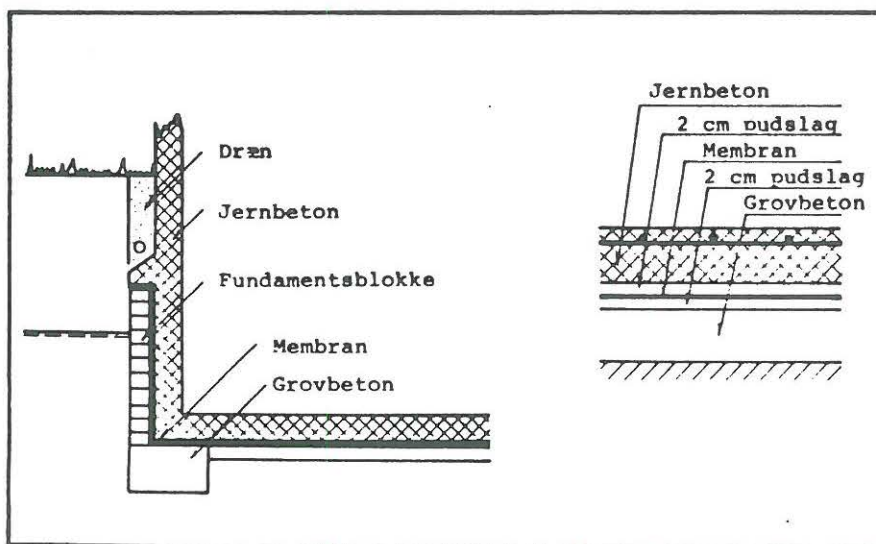
Man må i så fald sørge for at eventuel revnedannelse i betonen ikke gør konstruktionen utæt. Dette opnås bedst ved at indføre et passende antal dilatationsfuger, der tætnes med specielle gummi-pakninger. I stedet for fuger kan konstruktionen gives et svækket tværsnit over pakninger. Denne metode anvendes, hvor revnen ønskes så lille som mulig. I gulvkonstruktioner kan de almindelige fugebånd svække konstruktionen u hensigtsmæssig meget, fordi betonen kan separere, når den skal skubbes ind under fugebåndets kanter. Der er derfor konstrueret nye fugebånd, der er beregnet til at ligge på gulvets underside.

Man kan efter at den midlertidige grundvandssænkning er ophørt komme ud for, at betonen trods alt er utæt. Der findes dog i dag en række midler, der ved tilsætning til betonen kan gøre den så hurtigt størknende, at reparation i nogle tilfælde kan foretages fra indersiden, eller ved påsmøring på den fugtige utætte betonoverflade kan trænge ind i betonen og gøre den tæt.

Fuger i vandtæt beton



Membranisolering





## 7.5 ANDRE METODER

Grundvandsproblemer kan løses på andre måder end nævnt i de foregående afsnit. Der skal her kun for orienteringens skyld nævnes andre muligheder, idet en nøjere gennemgang naturligt falder ind i andre afsnit.

### AFSKÆRING AF GRUNDVANDSSTRØMNING

Når vandstrømningen i de vandførende lag bliver for kraftig, kan en almindelig grundvandssenkning blive meget kostbar, og det kan da være økonomisk forsvarligt at gennemskære det vandførende lag med en tæt væg. Metoden kan kombineres med en grundvandssenkning i andre mindre vandførende lag.

Den hyppigst anvendte fremgangsmåde består i at nedramme en spuns-væg, hvis det vandførende lag ligger tæt på jordoverfladen. (Spunsvægge omtales i afsnit 10.2).

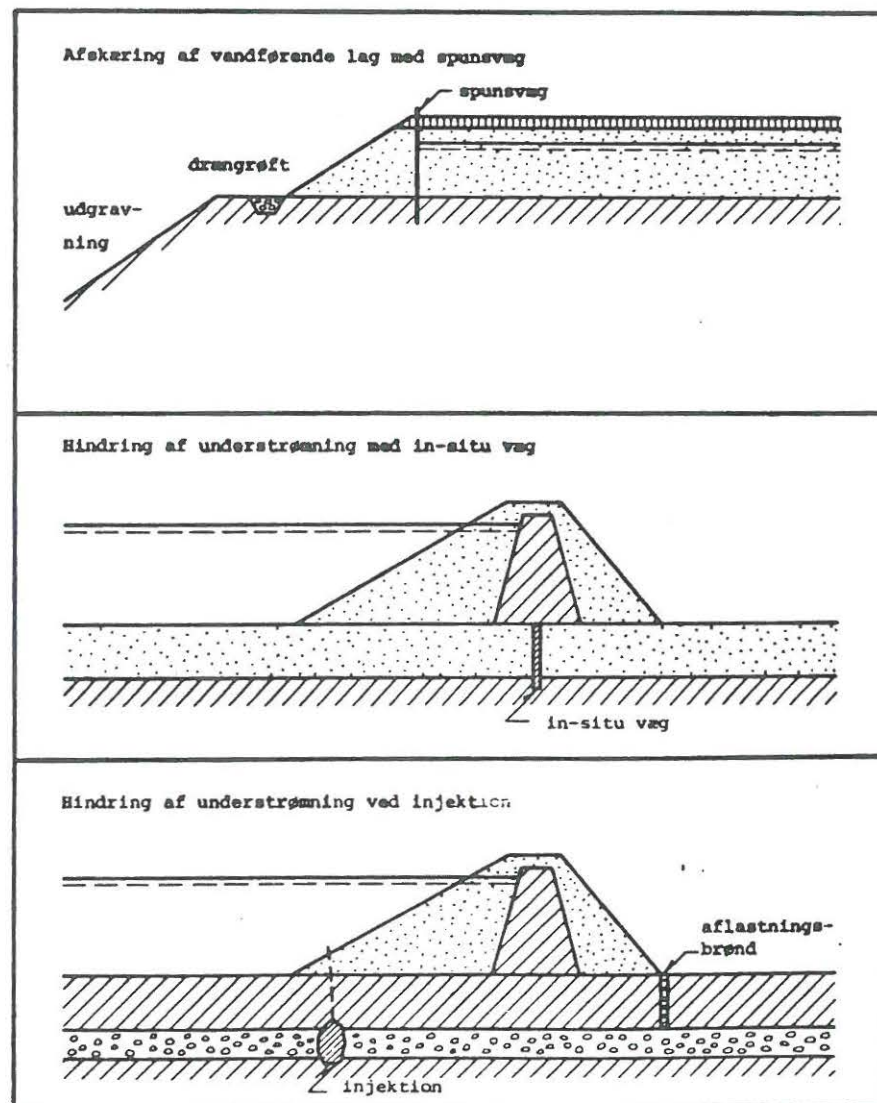
På større dybder kan det være billigere at udføre en in situ væg, der udgraves med en speciel gravemaskine, og hvor udgravningen fyldes med bentonitslam for at stabilisere siderne. Hvis væggen kun skal tjene tætningsformål, fyldes udgravningen igen med bentonitslam tilsat finsand eller med andet for hånden værende tætningsmateriale.

I enkelte tilfælde kan laget ligge så dybt, at det vil være billigere at forsøge opbygget en væg netop i det vandførende lag ved injektion af et tætningsmateriale i jordens porer.

På figuren er vist nogle eksempler på afskærende konstruktioner.

### VÅDGRAVNING

Skønnes det for dyrt at udføre en grundvandssenkning eller en afskæring, kan man udføre den indledende fase af et byggeri som vådgravning og undervandsstøbning af beton. En byggegrube kan således etableres ved først at etablere indfatningen (f.eks. spunsvægge eller in-situ-vægge), udgrave vådt og derefter udstøbe byggegrubens bund af undervandsbeton. Denne metode omtales i anlægsteknik.



**LITTERATUR**

Leonards, G.A. 1962:  
Foundation Engineering.

Harr, M.E. 1962:  
Groundwater and Seepage.

Hansen, Aage 1960:  
Grundvandssænkning. Fundering. Teknisk Forlag.

Hansen, H. Kryger 1971:  
Grundvandssænkning. Forelæsningsnotat.



